

## **CAPITULO I**

### **DISEÑO TEORICO – METODOLOGICO**

#### **1.1.ANTECEDENTES Y JUSTIFICACION**

##### **1.1.1. INTRODUCCIÓN**

Las propiedades de las mezclas asfálticas pueden ser modificadas para mejorar las características de los pavimentos convencionales. Hay casos en los cuales los pavimentos flexibles presentan problemas al no generar la resistencia adecuada frente a cargas producidas por el tráfico y la acción del clima. Para tratar de solucionar los problemas mencionados anteriormente, se ha optado por modificar las propiedades de las mezclas asfálticas, mediante la investigación e implementación de materiales que colaboren con los problemas estructurales y que sean amigables con el medio ambiente. Un posible material para modificar mezclas asfálticas es el Tereftalato de Polietileno, PET por sus siglas en inglés. Este es un material comúnmente usado para envases de bebidas.

En el presente trabajo se busca reutilizar desechos de Tereftalato de Polietileno (PET) generados por empresas y hogares, incorporándolos a la mezcla asfáltica y observar si presenta mejoría en sus propiedades mecánicas, además de contribuir a la reutilización de los desechos.

Con respecto al Medio Ambiente se podría ayudar mucho a mantener el mismo al reciclar productos plásticos y darles un uso técnico en el diseño de pavimentos ya que la contaminación provocada por desechos plásticos es crítica en el país y de acuerdo con información de prensa, en la capital, el 65% de la basura es material orgánico y 35% inorgánico, generados en un 70% por hogares y 30% por

industrias y comercio Entre los principales desechos inorgánicos están el plástico, papel, cartón, vidrio, aluminio y lata. En los últimos años, por las tendencias del mercado, los productos alimenticios usan envases de plástico que, por su menor costo, han sustituido al vidrio y al cartón.

Quizá convenga saber algunos datos acerca de las botellas plásticas para tomar más noción de su efecto negativo:

- Una botella tarda unos 700 años en descomponerse.
- El 80% de las botellas no se reciclan, millones van cada año a la basura.
- Hacen falta 100 millones de litros de petróleo para fabricar mil millones de botellas.

Al no ser un material biodegradable, los plásticos se convierten en un serio problema de contaminación, pues duran muchos años en descomponerse.

Actualmente los desechos plásticos son llevados al relleno sanitario a cargo de los municipios, pero genera contaminación al medio ambiente, por lo que el darle uso en la construcción de caminos a todos estos desechos plásticos constituye una herramienta que no solo podría ser novedosa en el campo de la Ingeniería Civil si no que contribuiría a la mantención de nuestro ecosistema.

Al conocer estos antecedentes ya mencionados al principio, he tomado la decisión de resolver estos problemas de carácter técnico, social y medio ambiental al introducir material reciclado de Tereftalato de Polietileno (PET I) a la mezcla asfáltica convencional, con el fin de mejorar sus propiedades de Estabilidad y de Flujo o Fluides.

Todos los ingenieros civiles que desempeñan sus funciones en el campo vial se podrían ver beneficiados por este proyecto ya que se tipifican modelos de pavimentos de buenas características que debido al uso de material reciclado pueden resultar más económicos. De esta forma, los beneficios de este proyecto podrían sobrepasar los niveles locales alcanzando interés a nivel nacional, de acuerdo a los resultados obtenidos.

Es importante acotar que al usar material reciclado se puede beneficiar a un gran sector de la sociedad pues se contribuirá de manera directa a la disminución de la contaminación actual.

### **1.1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO**

En nuestro medio, tanto pavimentos flexibles como rígidos, pueden verse afectados por problemas típicos de deterioro por paso del tiempo y por uso vehicular constante como son hundimientos, baches y grietas. Estos desperfectos además de ocasionar tráfico (embotellamiento vehicular), accidentes y averías vehiculares también impactan en las finanzas públicas, al requerir presupuestos mayores para los trabajos de mantenimiento constante.

Las quejas y críticas por parte de muchos usuarios de las vías y que corresponden a sectores de la sociedad son generalizados debido a la presencia recurrente de los problemas descritos y que lastimosamente alteran la cotidianidad de la sociedad. Tomando en cuenta que son el medio de comunicación principal del país deben ser tratadas con la importancia suficiente pues cualquier alteración en su normal funcionamiento puede perjudicar seriamente la economía nacional.

Debido a todos estos problemas se ha introducido en nuestro mercado el uso de polímeros que modifican directamente a las mezclas en su composición dándoles mayor resistencia, entre otras características, pero que sin duda aumentan considerablemente los costos de los proyectos. Es por esto que nuestra propuesta se basa en el uso de material reciclado, específicamente el uso de botellas recicladas

correspondientes a PET Tipo 1 como componente adicional de las mezclas tradicionales para el pavimento flexible.

De éste tema tratado y dependiendo de los resultados obtenidos se podrían ver interesados todos los profesionales, empresas y distintas instituciones relacionadas con la Ingeniería Civil que se dedican tanto al diseño así como a la construcción vial pues podrían ver reducidos significativamente los costos de un proyecto al usar pavimentos de calidad cuyos componentes fueron mejorados o sustituidos con material reciclado.

Adicional a esto está la grave contaminación de la que adolece nuestro país y como ya se mencionó en los puntos anteriormente tratados, la cantidad de sólidos reciclados, especialmente lo que respecta a botellas plásticas es increíblemente baja por lo que el usar todo este material en la construcción de carreteras representaría un desahogo a tanto desperdicio que contamina el medio ambiente y que sin duda afecta a muchos sectores sociales.

En nuestro país hay ciertas políticas que motivan al reciclaje y que en algunos casos son relegadas a grupos conservacionistas de menor envergadura pero al existir regulaciones locales se pueden emitir políticas y normas técnicas que conduzcan al establecimiento de ordenanzas y programas municipales sobre el reciclaje de los residuos sólidos.

“Los planteamientos mencionados permiten definir factores que deben ser resueltos, si se desea que los programas comunitarios de reciclaje alcancen una importancia significativa dentro de la jerarquía de actividades que conforman la gestión integral de los desechos sólidos. Estos asuntos no presentan obstáculos insalvables; al contrario, una vez identificados, se vuelven áreas de oportunidad que pueden ser aprovechadas muy eficientemente.”

En resumen se puede decir que el estudio de este proyecto puede contribuir enormemente a la salida de mucha cantidad de dichos desechos dándoles un uso eficaz

estrechamente ligado a uno de los pilares del desarrollo del país como son las vías terrestres.

## **1.2.DISEÑO TEÓRICO**

### **1.2.1.Planteamiento del problema**

#### **1.2.1.1. Situación Problemática**

Las calles de nuestra ciudad son afectadas por varios factores como ser por el paso del tiempo y por el uso constante por los vehículos, estos desperfectos son comunes como ser; baches fisuras, etc. ocasionando un presupuesto mayor en las instituciones para el mantenimiento de las mismas.

Para solucionar estos desperfectos de las calles se emplean en la actualidad materiales a base de polímeros como ser; geomembranas, geosintéticos para mejorar su resistencia, pero como ya se mencionó el uso de estos materiales hacen subir considerablemente el costo.

Como también la alta contaminación del medio ambiente de nuestro país. Según los datos actuales en Bolivia se genera anualmente 1.7 millones de toneladas de residuos sólidos, el cual 22.1% corresponden a desechos reciclables (botellas de plástico PET tipo1). En los últimos años, por las tendencias del mercado, los productos alimenticios usan envases de plástico que, por su menor costo, han sustituido al vidrio y al cartón. Al no ser un material biodegradable, los plásticos se convierten en un serio problema de contaminación, pues duran muchos años en descomponerse.

#### **1.2.1.2.Problema**

¿Las características de Estabilidad y Flujo de una mezcla asfáltica podrán ser mejoradas al añadir Tereftalato de Polietileno?

## **1.2.2. OBJETIVOS**

### **1.2.2.1. Objetivo general**

Encontrar el porcentaje optimo de Tereftalato de Polietileno (PET), para introducirlo a las mezclas asfálticas, con el fin de mejorar sus propiedades de Estabilidad y Flujo para luego comparar los resultados con las mezclas tradicionales.

### **1.2.2.2. Objetivo especifico**

- Realizar el diseño de una mezcla asfáltica en caliente mediante el ensayo Marshall, primero mediante la norma ASTM y luego con la introducción del Tereftalato de Polietileno (PET Tipo I).
- Realizar la caracterización de los agregados y el cemento asfáltico a utilizar en la mezcla asfáltica convencional y mezcla asfáltica añadiendo PET.
- Realizar las pruebas Marshall con briquetas preparadas con diferentes porcentajes de PET añadido a la mezcla asfáltica convencional
- Realizar el análisis comparativo entre la mezcla asfáltica en caliente tradicional y la mezcla asfáltica en caliente con PET Tipo 1 en su composición, en función de los resultados obtenidos de estabilidad y flujo y demás características.
- Establecer conclusiones y recomendaciones en base a los resultados que se obtengan de la investigación sobre la incidencia del PET añadido a la mezcla asfáltica convencional

## **1.2.3. HIPOTESIS**

El Tereftalato de Polietileno (PET Tipo I) al tener buenas propiedades físico-mecánicas, se introducirá a la mezcla asfáltica convencional reforzando su estructura actuando como parte del agregado y como un agente adhesivo para las partículas, entonces realizando ensayos Marshall se podrá evaluar sus propiedades y su incidencia en base a mezclas asfálticas añadiendo PET y mezcla asfáltica convencional.

#### **1.2.4. DEFINICIÓN DE VARIABLES INDEPENDIENTES Y DEPENDIENTES**

##### **1.2.4.1. Variable Independiente**

Tereftalato de Polietileno (PET Tipo I) que será añadido en la mezcla asfáltica en un porcentaje de 3 al 20% en función del contenido óptimo de Betun

##### **1.2.4.2 Variable Dependiente**

La ESTABILIDAD Y FLUJO de las mezclas asfálticas

*Tabla 1.1: Conceptualización y Operacionalización de Variables*

Variable Nominal	Conceptualización	Operacionalización		
		Dimensión	Indicador	Valor Acción
VARIABLE INDEPENDIENTE Porcentajes de Tereftalato de Polietileno (PET)	Variación en los porcentajes de Tereftalato de Polietileno (PET) que se añadirán a la mezcla asfáltica convencional	Diseño de una Mezcla Asfáltica Adicionando Tereftalato de Polietileno (PET Tipo I)	% del 3 al 20% Tereftalato de Polietileno (PET Tipo I)	Elaboración de briquetas
			% de Betún	
			% de Agregados	
VARIABLE DEPENDIENTE la estabilidad y el flujo o de la mezcla asfáltica	Se refiere a los parámetros, que caracterizan a la estabilidad y el flujo de la mezcla asfáltica	Evaluación de una mezcla asfáltica adicionando Tereftalato de polietileno (PET Tipo I)	% de Tereftalato de polietileno (PET Tipo I)	Ensayos Método Marshall

*Fuente: Elaboración Propia*

### 1.3.DISEÑO METODOLÓGICO

### 1.3.1. COMPONENTES

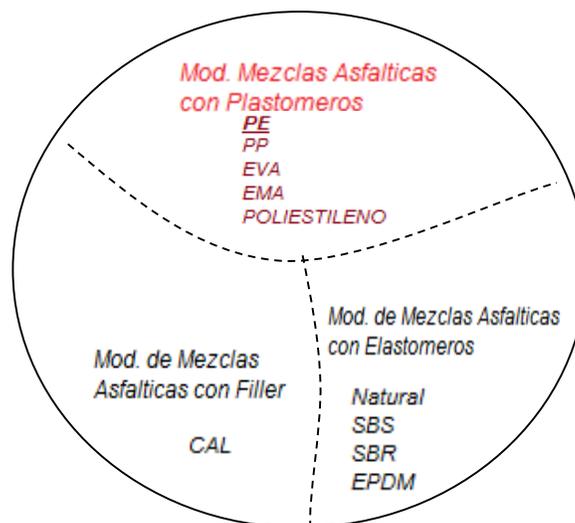
#### 1.3.1.1. Unidades de Estudio y Decisión Muestral

##### 1.3.1.1.1. Unidad de Estudio

- Mezclas Asfálticas Modificadas con Tereftalato de polietileno (PET Tipo I)

##### 1.3.1.1.2. Población

- Modificación de Mezclas Asfálticas



##### 1.3.1.1.3. Muestra

Se utilizará una muestra representativa de mezcla asfáltica para realizar briquetas de la siguiente manera:

- Mezcla Asfáltica en caliente Adicionando Tereftalato de polietileno (PET Tipo I)
- Mezcla Asfáltica en caliente convencional

##### 1.3.1.1.4. Muestreo

El muestreo para la obtención del Tereftalato de Polietileno (PET Tipo I) se lo realizara mediante el reciclado y el triturado del mismo se lo realizara manualmente. Mientras que para los agregados se tendrá mucho cuidado que no presenten material orgánico ni tampoco material sólido y cemento asfáltico se deberá tomar en cuenta que tenga una buena consistencia y viscosidad.

Se realizan distintos tipos de muestro en base al los porcentajes y tamaño del Tereftalato de Polietileno (PET Tipo I) que se añadirá a la mezcla asfáltica.

El Tereftalato de Polietileno (PET Tipo I) tendrá forma de fibra y de dos tipos de tamaño: retenido en tamiz #4 o pasante del tamiz #3/8 y retenido en el tamiz #40 o pasante del tamiz #10.

### **1.3.2. MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS**

#### **1.3.2.1 Selección de Métodos y Técnicas**

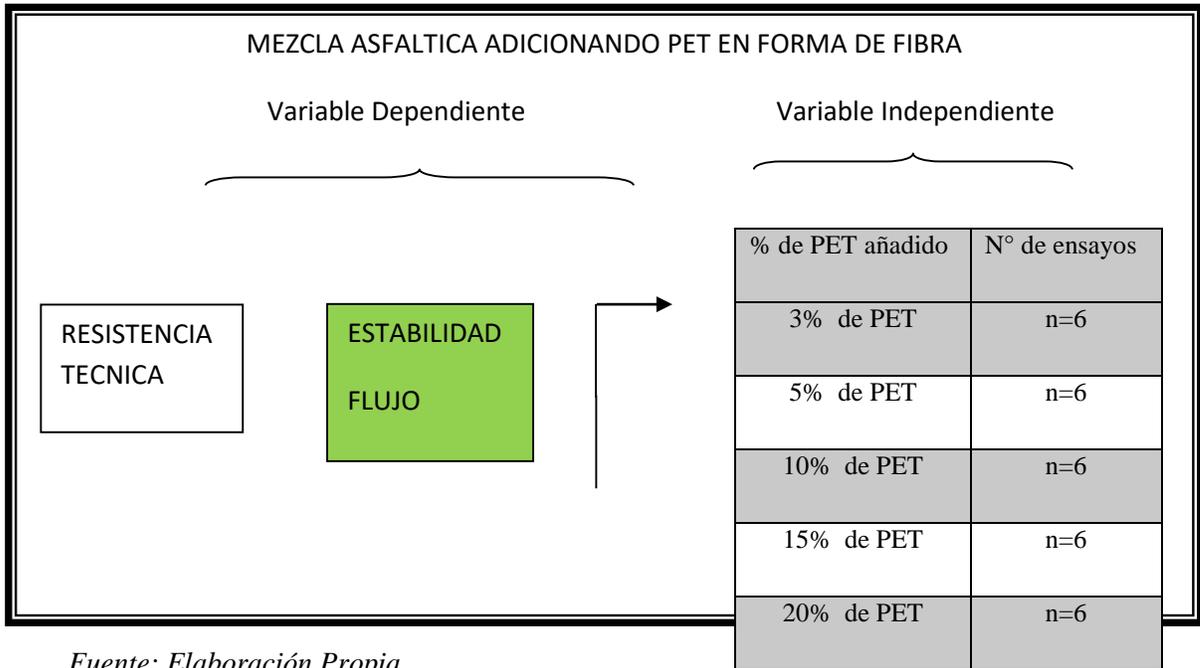
El método que se realizará para la evaluación de una mezcla Asfáltica Adicionando Tereftalato de Polietileno (PET Tipo I), es el método convencional de Mezclas Asfálticas en Calientesegún ASSTHO, para luego adicionar Tereftalato de Polietileno (PET Tipo I) reciclado y triturado manualmente.

Para los agregados y el Betún se realizara su caracterización para conocer sus propiedades, al obtener los datos se hará la comparación con los parámetros establecidos por norma para conocer si se encuentran dentro de los rangos. Posteriormente se procederá a realizar las mezclas asfálticas en caliente haciendo variar el contenido de Betún para encontrar el contenido óptimo del mismo.

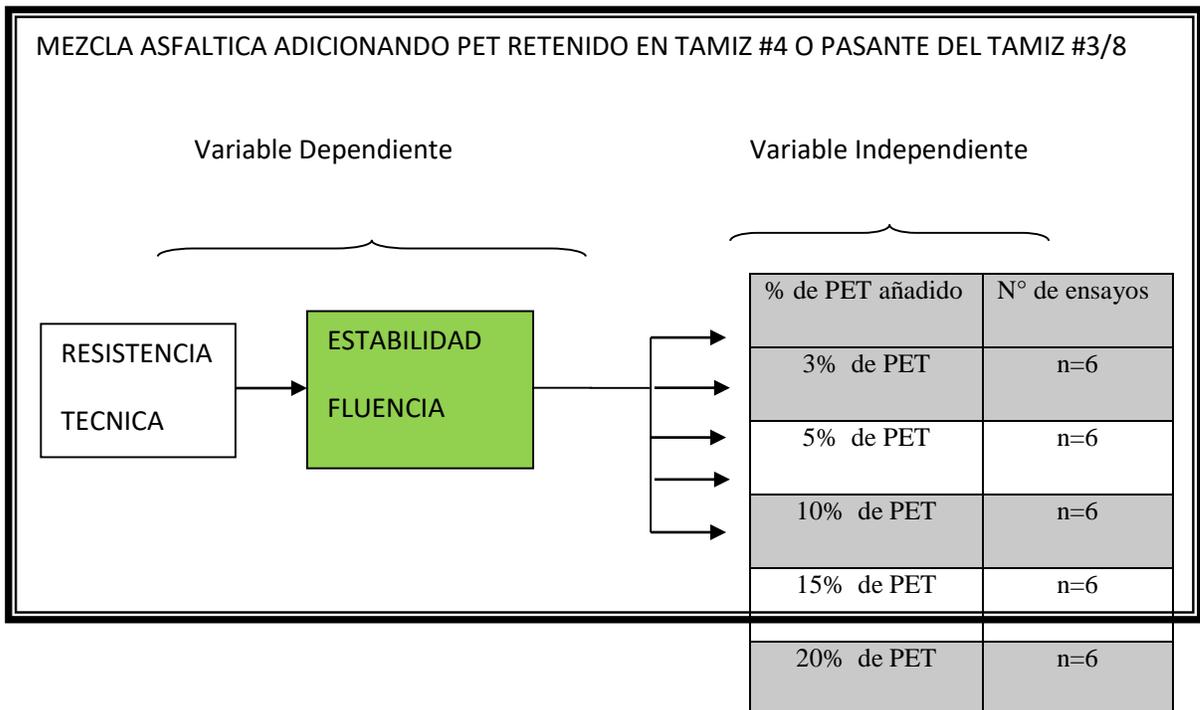
Una vez encontrado el porcentaje optimo de los agregados y cemento asfáltico, se procederá a la adición del Tereftalato de Polietileno (PET Tipo I) a la mezcla, para esto se escogieron tres formas de PET y porcentajes en un rango entre 3% y 20% con respecto al porcentaje optimo de asfalto.

Para ello es necesario determinar la cantidad de ensayos que se deben realizar, como se propone en las siguientes gráficas.

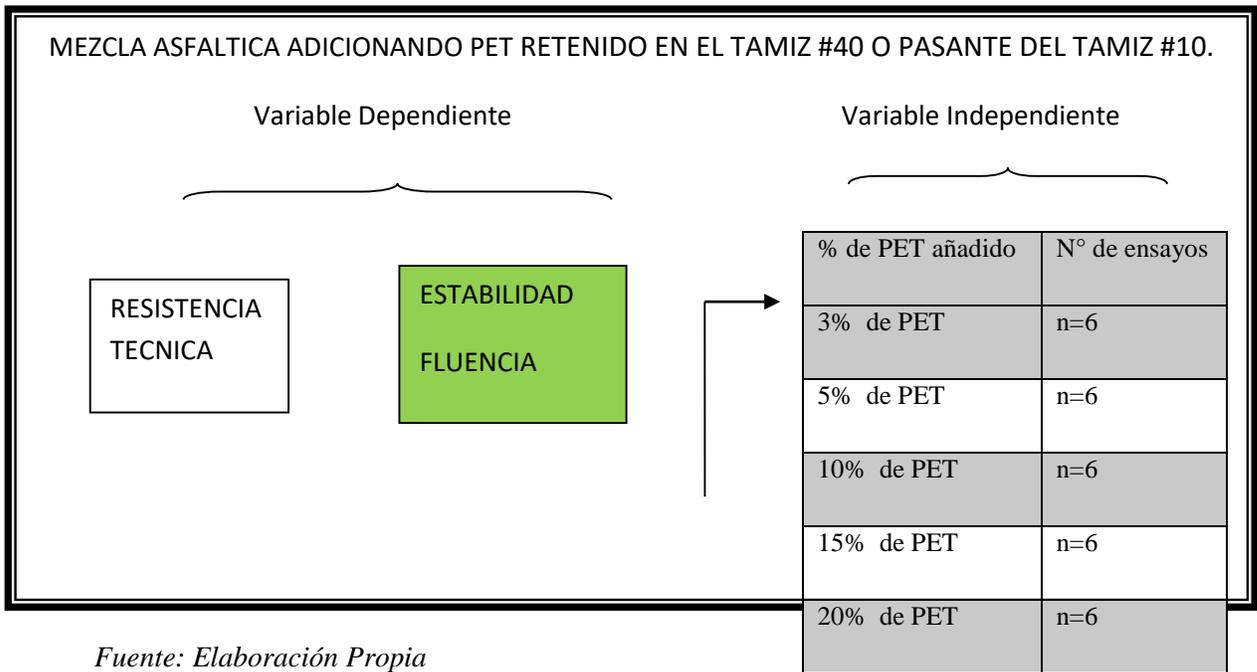
Esquema 1.1: Porcentaje de PET en forma de Fibra



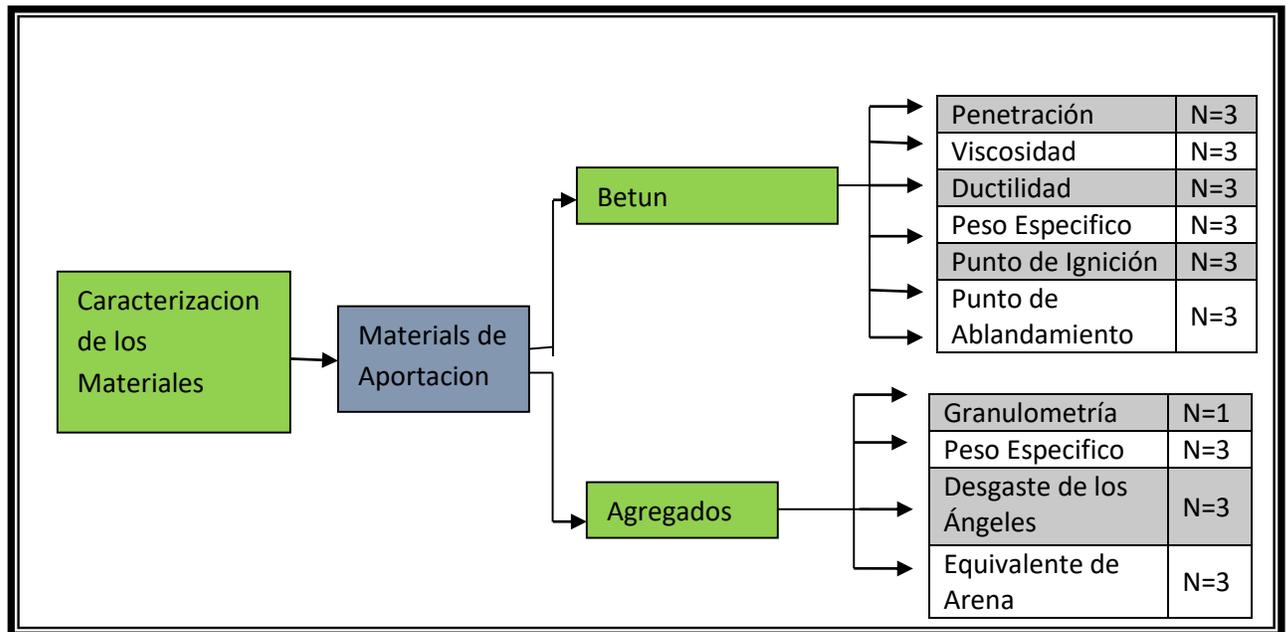
Esquema 1.2: Porcentaje de PET retenido en tamiz #4 o pasante del tamiz #3/8



Esquema 1.3: Porcentaje de PET retenido en el tamiz #40 o pasante del tamiz #10



Esquema 1.4: Cantidad de ensayos para la caracterización de materiales.



Fuente: Elaboración Propia

### **1.3.2.2. Técnicas de Muestreo**

#### **1.3.2.2.1. Técnica de muestreo No Probabilística**

El muestreo no probabilístico se aplica para la obtención del PET reciclado en sus distintas formas y de los materiales de aportación, como son los agregados y el Betún, ya que estos materiales son seleccionados intencionalmente. Los agregados de aportación se obtendrán del acopio de la planta de asfaltos de la Alcaldía Municipal de la Ciudad de Tarija, ubicado en la comunidad de La Pintada, que éste a su vez tiene como banco a la chancadora de San Mateo.

El betún tiene procedencia del país de Brasil y será proporcionado por la Alcaldía Municipal de la Provincia Cercado del Departamento de Tarija.

#### **1.3.2.2.2. Descripción de Equipos e Instrumentos**

##### **A. Para la caracterización de los agregados**

Tanto para los agregados a reciclar como para los agregados de aportación:

- a. Horno Eléctrico.-El horno eléctrico es utilizado para el secado de los agregados de aportación, y debe contar con una temperatura constante de 100 a 110 °C.
- b. Balanza.- La balanza es usada para obtener los distintos pesos que se requiera, con una sensibilidad de 0.1 gr.
- c. Juego de Tamices.- El juego de tamices debe seguir la norma ASTM E-11, lo cual contiene los tamices 1", ¾", ½", 3/8", No. 4, No. 10, No. 40, No. 200, tapa y fondo.

##### **B. Para la caracterización del betún**

Tanto para el betún a reciclar como para el betún de aportación:

- a. Penetrómetro de Asfalto.- Que sirve para determinar la penetración del cemento asfáltico en estudio.

- b. Viscosímetro del AsphaltInstitute y el baño de viscosímetro Saybolt.- Con los cuales se determina la viscosidad del cemento asfáltico en estudio.
- c. Aparato para la determinación del punto de inflamación Cleveland de copa abierta.- Con el cual se determina el punto de Ignición o punto de llama del cemento asfáltico en estudio.
- d. Ductilímetro.- Con el cual se determina la ductilidad del cemento asfáltico, a una temperatura estándar de 25 °C.
- e. Peso Específico.- Que sirve para determinar la densidad del cemento asfáltico.

### **C. Para la dosificación y diseño de briquetas**

- a. Moldes de compactación para asfaltos.- En estos moldes se vaciará la mezcla convencional y la mezcla añadiendo PET, creando briquetas con distintos porcentajes de cemento asfáltico y PET.
- b. Compactador para moldes para asfaltos.- Este compactador sirve para compactar las briquetas según especificaciones técnicas.

### **D. Para los ensayos de resistencia técnica**

- a. Marco de carga multiplex Marshall.- Este marco sirve para disponer en él los distintos cabezales, según las pruebas que se requiera.
- b. Cabezal de Rotura Marshall.- Este cabezal junto con el marco multiplex, permite realizarlos ensayos de estabilidad y fluencia para las briquetas en análisis.

### **1.3.2.2.3.Procedimiento de Aplicación**

#### **a. Extracción de las muestras PET**

Se procede al reciclado de PET de los distintos productos como ser embases de gaseosas y agua.

Una vez obtenido una cantidad importante de PET se procedió a su limpieza y trituración manual para obtener los tres tipos de formas que utilizaremos para añadirlo

a la mezcla convencional, las mismas serán llevadas al laboratorio de asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

#### **b. Caracterización de los agregados**

Para caracterizar los agregados de aporte, se deben someter al horno el secado y luego someterlo a la serie de tamices, con trillado constante en el RopTap por unos quince minutos aproximadamente, luego de este tiempo proceder al pesaje del material que contiene cada tamiz.

Con estos valores obtener las curvas granulométricas tanto para los agregados de aporte.

Analizar ambas curvas granulométricas y compensar los porcentajes, de tal manera que se obtenga una nueva curva granulométrica, optimizando el agregado a reciclar. Esta nueva curva granulométrica debe cumplir con las normas que proporcionan rangos máximos y mínimos para cada tamiz.

#### **c. Caracterización del Betun.**

En este proyecto la caracterización del Betun de aporte, se basa en la determinación de la Viscosidad, Penetración y Punto de Inflamación, ya que se considera que son los tres parámetros más importantes para el presente estudio, como también se realizaron los ensayos de ductilidad, peso específico y punto de ablandamiento. Estos parámetros deben cumplir con los rangos especificados por normas, caso contrario no sería viable para realizar mezclas asfálticas y se buscaría otra procedencia del Betun.

#### **d. Dosificación y diseño de briquetas**

Para la dosificación de las briquetas, se debe considerar que la granulometría del agregado será constante, como se determinó anteriormente. A este agregado se le añadirá el porcentaje de Betunoptimo e incluir el PET, siendo éste último variable en su porcentaje. De tal manera se obtendrán briquetas con cinco porcentajes de PET en cada una de sus formas, para luego someterlos a las pruebas de resistencia técnica.

Es necesario resaltar que para el diseño de las briquetas se seguirá el Método Marshall.

#### **e. Ensayos de resistencia técnica**

Para los ensayos de resistencia técnica, se deben tener listas las briquetas, con su respectiva enumeración, para luego someterlas a las pruebas de Densidad, Estabilidad y Fluencia según el Método Marshall.

##### **1.3.2.2.4. Preparación Previa**

Dentro de la preparación previa a los ensayos, es necesario contar con tablas que permitan la tabulación de datos, donde especifique el lugar de obtención, el tipo de muestra, el ensayo a realizar, la numeración respectiva y los datos que se van a necesitar para cada tipo de ensayo.

Junto con lo anterior debe ir un cronograma de actividades para que permita el fácil desarrollo de las actividades o acciones a realizar.

### **1.3.3. PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS Y LA INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN**

El presente trabajo es un estudio de investigación y experimental, se tiene un tamaño de muestras aproximado de 30 briquetas por mezcla, las cuales serán sometidas al ensayo de resistencia Marshall

Una vez obtenidos los resultados de la resistencia técnica, se procede al tabulado y si es necesario corregir los resultados obtenidos de cada ensayo.

Con los ensayos de caracterización determinamos el cumplimiento de requisitos mínimos según normas, que deben tener tanto del ligante que es el Betun, los agregados y los porcentajes de PET.

Con los ensayos de pruebas de resistencia técnica determinamos las siguientes curvas:

- 1) % de PET vs. Densidad
- 2) % de PET vs. Estabilidad
- 3) % de PET vs. Flujo
- 4) % de PET vs. % de Vacíos de la Mezcla

- 5) % de PET vs. Relación Betún Vacíos
- 6) % de PET vs. Vacíos de Agregado Mineral

De cada curva se selecciona el valor del porcentaje de PET más adecuado con previo análisis. El valor más aproximado del porcentaje óptimo de PET para la mezcla, es el promedio de los valores seleccionados. Con este porcentaje promedio aproximado, finalmente se define el porcentaje óptimo de PET, sin embargo como se trata de optimizar los recursos, se debe elegir un valor donde la resistencia sea tolerable, es decir, mayor a la resistencia mínima de una mezcla convencional.

#### **1.4.ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN**

En resumen el alcance que tendrá este trabajo es la Evaluación de una Mezcla Asfáltica añadiendo Tereftalato de Polietileno (PET Tipo I).

En el primer capítulo, se describe de manera general de que trata la Evaluación de una Mezcla Asfáltica añadiendo Tereftalato de Polietileno (PET Tipo I), la situación problemática, los objetivos, la justificación y el alcance del presente proyecto.

El segundo capítulo, comprende la parte teórica, donde se detalla el estado de conocimiento, es decir, toda la información necesaria y relevante al proyecto, como es todo lo referente a los agregados, cemento asfáltico y el PET a utilizar, diseño de carpetas asfálticas según el método Marshall, normas, etc.

El tercer capítulo, describe los medios y criterios para obtener los datos de caracterización tanto de los materiales de aportación, que luego son procesados y analizados según normas. También se aplica el diseño de briquetas con el método Marshall, en planta en caliente, con dos tipos de análisis, el primero de una mezcla asfáltica convencional y el segundo adicionando PET a la mezcla convencional; para ambos casos se trabaja con cinco porcentajes en análisis, que con dichos resultados se logra obtener el porcentaje óptimo de Betun y PET.

El cuarto capítulo, comprende todo el diseño de briquetas a partir de un análisis final de datos, también establece la forma de determinar el porcentaje óptimo del cemento asfáltico y PET, según curvas de correlación de la variable independiente que es el porcentaje de PET, con la variable dependiente que es la resistencia técnica. Para luego con estos resultados realizar una propuesta final del proyecto.

El quinto capítulo, establece las conclusiones a partir de lo planteado en los objetivos del presente proyecto y las recomendaciones para la correcta aplicación y ejecución de este trabajo.

## **CAPÍTULO II**

**GENERALIDADES Y DEFINICIONES SOBRE EL TEREFTALATO DE  
POLIETILENO, AGREGADOS, BETUN, MEZCLA ASFALTICA  
CONVENCIONAL, MEZCLA ASFALTICA ADICIONANDO PET Y  
ENSAYO MARSHALL DE DISEÑO DE MEZCLAS.**

**2.1.EL TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET)**

**2.1.1. DEFINICIÓN**

“PET, que por sus siglas en inglés significa *Polyethylene Terephthalate* o Tereftalato de Polietileno corresponde a un tipo de material plástico derivado del petróleo y se caracteriza a nivel químico por presentar su fórmula como la de un poliéster aromático.” (Wikipedia, La Enciclopedia Libre, 2011)

El PET, y en nuestro caso el correspondiente al Tipo 1 es factible de reciclar ya que corresponde al grupo de los termoplásticos, los cuales se deforman o se vuelven flexibles cuando son sometidos a temperaturas relativamente altas pudiendo alcanzar el estado líquido y consecuentemente sufrir un proceso de cristalización cuando dichas temperaturas disminuyen.

Haciendo un poco de referencia a la historia de este material, se debe su descubrimiento a los científicos británicos Whinfield y Dickson en el año 1941, los mismos que aprovecharon para patentar su invento como un polímero para la fabricación de fibras.

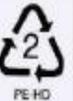
El PET alcanzó auge en 1952 cuando se lo comenzó a utilizar en forma de film, es decir como lámina o película delgada, destinada principalmente al embasamiento de alimentos pero sin duda la aplicación que revolucionó su uso y que por ende representa su principal mercado hasta la actualidad corresponde a la producción de envases rígidos; a partir del año 1976, dicho material pudo abrirse camino gracias a su buen comportamiento en el embotellado de bebidas carbonatadas.



**Figura 2:1** Tamaños y colores de botellas fabricadas con PET.

**Fuente:** <http://aliadopet.wikispaces.com/>

En la siguiente tabla exponemos la clasificación del plástico de acuerdo a la Sociedad de la Industria del Plástico (SPI) que considera su tipo, características, aplicaciones y usos después del reciclado:

Termoplásticos			Aplicaciones	Usos después del reciclado
Polietileno tereftalato	PET		Botellas, envasado de productos alimenticios, moquetas, refuerzos neumáticos de coches.	Textiles para bolsas, lonas y velas náuticas, cuerdas, hilos
Polietileno alta densidad	PEAD		Botellas para productos alimenticios, detergentes, contenedores, juguetes, bolsas, embalajes y film, laminas y tubos	Bolsas industriales, botellas detergentes, contenedores, tubos

**Figura 2:2** Clasificación de los Plásticos.

**Fuente:** <http://www.recytrans.com/blog/como-se-recicla-el-plastico/>

### **2.1.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA**

Es un polímero termoplástico, con un alto grado de cristalinidad. Como todos los termoplásticos pueden ser elaborados mediante proceso de extrusión, inyección y soplado, soplado de preforma y termo-conformado. Para evitar el crecimiento excesivo de las esferulitas y lamelas de cristales, este material debe ser rápidamente enfriado, con esto se logra una mayor transparencia, la razón de su transparencia al enfriarse rápido consiste en que los cristales no alcanzan a desarrollarse completamente y su tamaño no interfiere con la trayectoria de la longitud de onda de la luz visible.

### 2.1.3. PROPIEDADES

Las propiedades físicas del PET y su capacidad para cumplir diversas especificaciones técnicas han sido las razones por las que el material haya alcanzado un desarrollo relevante en la producción de fibras textiles y en la producción de una gran diversidad de envases, especialmente en la producción de botellas, bandejas, flejes y láminas.

Tabla 2: 1Propiedades Físicas PET Tipo 1

<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>	
Absorción de Agua - Equilibrio (%)	< 0.7
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.3 - 1.4
Índice Refractivo	1.58 - 1.64
Inflamabilidad	Auto Extinguible
Resistencia a los ultravioletas	Buena

Fuente: ESPOL, Aplicación para PET reciclado, 2014.

Tabla 2:2 Propiedades Mecánicas PET Tipo 1.

<b>PROPIEDADES MECÁNICAS</b>	
Coefficiente de Fricción	0.2 - 0.4
Dureza - Rockwell	M94 – 101
Resistencia a la Tracción (Mpa)	190 – 160
Resistencia al Impacto (Jm <sup>-1</sup> )	13 – 35

Fuente: ESPOL, Aplicación para PET reciclado, 2014.

Tabla 2:3 Propiedades Químicas PET Tipo 1

<b>RESISTENCIA QUÍMICA</b>	
Ácidos Concentrados	Buena
Álcalis	Mala
Alcoholes	Buena

**Fuente:** ESPOL, Aplicación para PET reciclado, 2014.

#### **2.1.4. FORMAS DE OBTENCIÓN DEL PET**

El proceso comienza con el reciclado de PET, tomando muy en cuenta que las botellas sean transparentes y que estas no tengan un aspecto de desgaste.

Teniendo una buena cantidad de PET se procedió al lavado de las mismas con agua y detergente para eliminar restos de bebida gaseosa, materia orgánica y las etiquetas de los embases.

Para obtención de las distintas muestras se procedió al triturado manual empleando dos tipos de herramienta: cierra tijera.

Luego estas formas de PET trituradas y en forma de fibra serán llevadas al laboratorio para su respectivo tamizado para obtener los tamaños requeridos para este estudio.

##### **2.1.4.1. TIPOS DE RECICLADO**

Existen varios tipos de reciclaje de PET, cuyas denominaciones y características, son las siguientes:

###### **2.1.4.1.1. Reciclado mecánico**

A continuación se detalla el proceso de elaboración para la obtención de la escama de PET:



Figura 2.3: Proceso Reciclado Mecánico.

Fuente: <http://www.recicladospet.com/elaboracion.html>

El reciclado mecánico de las botellas de PET, permite la obtención de la materia prima para la elaboración de diferentes productos. El origen del elemento necesario para la obtención del PET, se obtiene a partir de 3 puntos de recogida principalmente.

- Botaderos de basura.
- Recogida selectiva.
- Residuos Industria "Virgen"

#### a) Alimentación Automática

El primer proceso de producción se basa en la colocación de los residuos sobre cintas transportadoras que mediante una sofisticada aplicación, separa los restos metálicos de las balas residuales.



Figura 2.4: Banda transportadora especializada en separar el metal del plástico.

Fuente: <http://www.recicladospet.com/elaboracion.html>

### **b) Primera Trituración**

La materia prima pasa a través de un doble molino de transmisión Directa.

### **c) Prelavado en Seco**

A continuación el material triturado pasa a un centrifugado para el lavado de plástico muy contaminado (tierra, piedras, vidrios, etc.).

### **d) Preparación de Banales**

El material lavado se dirige a una tolva para la separación en seco de las etiquetas y films. Cabe destacar que no existe tratamiento de depuración de agua de lavado.

#### **e) Segunda Trituración**

El material pasa a un sistema de optimización de la carga para aumentar la producción.

#### **f) Separación Fina de Banales**

A continuación se elimina los restos de etiquetas y polvo.

#### **g) Prelavado**

El siguiente proceso consiste en la eliminación de restos solubles de suciedad y metales.

#### **h) Lavado Químico a Temperatura**

Lavado enérgico a alta temperatura para eliminar pegamento y adhesivos con una mínima degradación del material. También elimina impregnaciones severas de aceites.

#### **i) Aclarado**

Este proceso consiste en la eliminación de restos de detergente, al igual que otros plásticos livianos.

#### **j) Proceso de Elaboración**

Eliminación del exceso de humedad, polvo y pequeños residuos existentes en el PET lavado.

#### **k) Separación de PVC**

Se conoce que el contaminante que más afecta a la calidad final del FLAKE DE PET son las partículas de PVC que se pueden encontrar en el proceso de reciclado, esto se lo realiza mediante un proceso de selección electrostática.

#### **l) Proceso de Elaboración**

Finalmente se obtiene una escama de alta calidad, la cual es materia prima para la fabricación de poliéster, cintas, fibras sintéticas, entre otros.

#### **2.1.4.1.2. Reciclado químico**

Para el reciclado químico, se han desarrollado distintos procesos. Dos de ellos, la metanólisis y la glicólisis, se llevan a cabo a escala industrial. El PET se deshace o despolimeriza: se separan las moléculas que lo componen y estas se emplean para fabricar otra vez PET. Dependiendo de su pureza, este material puede usarse, incluso, para el envasado de alimentos.

#### **2.1.4.1.3. Reciclado energético**

En cuanto al uso del PET como combustible alternativo, los envases pueden emplearse para generar energía ya que este material tiene un poder calorífico de 6.3 Kcal/Kg, y puede realizar una combustión eficiente. Esto es posible ya que durante su fabricación no se emplean aditivos ni modificadores, lo cual permite que las emisiones de la

combustión no sean tóxicas, obteniéndose tan sólo bióxido de carbono y vapor de agua.

## **2.2.MATERIALES CONSTITUTIVOS DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS**

### **2.2.1. AGREGADOS**

#### **2.2.1.1. Definición**

“Son materiales granulares sólidos inertes que se emplean en los firmes de las carreteras con o sin adición de ligantes y con granulometrías adecuadas; se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla con materiales aglomerantes de activación hidráulica o con cementos asfálticos.”  
(Collins, 1994)

El término agregado se refiere a partículas minerales granulares que se usan ampliamente para bases, sub-bases y relleno de carreteras. Los agregados también se usan en combinación con un material cementante para formar concretos para los firmes y estructuras de drenaje. Las fuentes de agregados incluyen los depósitos naturales de arena y grava, los pavimentos pulverizados de concreto y asfalto, el material pétreo resquebrajado y la escoria de altos hornos.

#### **2.2.1.2. Agregado Grueso**

Según el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, se define como agregado grueso (grava), a la parte del agregado pétreo total que queda retenido en el tamiz #4 (4.75mm).

Estos áridos son partículas granulares de material pétreo (es decir, piedras) de tamaño variable. Este material se origina por fragmentación de las distintas rocas de la corteza terrestre, ya sea en forma natural o artificial. En este último caso actúan los procesos de chancado o triturado utilizados en las respectivas plantas de áridos.

### **2.2.1.3. Agregado fino**

Según el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, se define como agregado fino, a la parte del agregado pétreo total que pasa el tamiz #4 (4.75mm).

El agregado fino se clasifica en términos generales en los siguientes sub-productos correspondientes a relleno mineral:

#### **a) Arena:**

Es el material granular fino resultado de la desintegración natural de rocas o del triturado de agregado de grado grueso. Se considera arena como aquel material granular que pasa el tamiz #4 con una abertura de ¼ plg y se retiene en la malla #200.

#### **b) Limo:**

Suelo pasante el tamiz #200 (75 µm) de la serie estandarizada de U.S. que presenta pocas o nulas características plásticas. Desde el punto de vista de la clasificación SUCS, el limo es un suelo o parte de un suelo de grano fino, con índice de plasticidad menor que 4. Los tamaños de sus partículas son más pequeños que los de las arenas y más grandes que las partículas de arcilla.

#### **c) Arcilla:**

Suelo pasante el tamiz #200 (75 µm) de la serie estandarizada de U.S. que presenta características plásticas bajo diferentes contenidos de humedad y que puede alcanzar una dureza considerable en condiciones secas. Desde el punto de vista de la clasificación SUCS, la arcilla es un suelo o parte de un suelo de grano fino, con índice de plasticidad igual o mayor que 4.

#### **d) Otros agregados**

Según la SUCS se definen dos tipos de agregados dentro de esta clasificación:

Turba: suelo compuesto por vegetales en varias etapas de descomposición, generalmente acompañadas por un hedor orgánico, de color marrón oscuro a negro, consistencia esponjosa y con textura variable entre fibrosa y amorfa. Su límite líquido es menor de 50.

Material Orgánico: se define semejante a la turba variando únicamente en que presenta límite líquido mayor a 50.

## **2.2.2. PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS**

### **2.2.2.1. Propiedades del Agregados Grueso**

Las siguientes características y propiedades son importantes para su uso en mezclas asfálticas:

#### ***a) Granulometría.***

“La granulometría es la característica física principal y fundamental de todo conjunto de partículas porque influye de forma muy importante en la resistencia mecánica del conjunto.

Normalmente se utilizan granulometrías bien gradadas, a fin de conseguir la máxima compacidad del conjunto, aunque también se emplean granulometrías discontinuas en el caso de algunas mezclas asfálticas.

Para encajar una granulometría dentro de algún uso normalizado se parte de fracciones para cada tamiz que luego se mezclan en las proporciones adecuadas. Los análisis granulométricos se realizan por tamizado partiendo de una material previamente lavado y secado.

En las mezclas asfálticas tiene una especial importancia las partículas de tamaño inferior a  $63\mu\text{m}$ , conocido como polvo mineral o fíller, pues algunas características relevantes de la mezcla dependen de la mezcla formada por la unión del polvo mineral y del ligante asfáltico.

#### ***b) Rozamiento interno***

Rozamiento interno se refiere a la capacidad de soporte o resistencia a la deformación de una capa o firme constitutiva del pavimento como la base, sub-base, etc., y que viene dada por la capacidad de rozamiento interno del esqueleto mineral conjugado con la acción del ligante utilizado. Éste rozamiento es directamente proporcional a la angulosidad de las partículas y se ve incrementado aún más si la textura superficial del agregado es áspera como por ejemplo en el caso de los agregados triturados.

También influye de forma importante la granulometría del agregado y el porcentaje de huecos del material compactado. A mayores densidades corresponden generalmente mayores resistencias mecánicas, por lo que la compactación es un factor muy importante.

#### ***c) Forma del agregado grueso***

La forma del agregado grueso varía ligeramente para un mismo tipo de tráfico que va a soportar el pavimento por lo que puede ser un parámetro un poco marginado.

Para un mejor funcionamiento del agregado se recomienda que presente formas cuboides tratando en la medida de lo posible evitar formas alargadas y planas semejantes a las conocidas lajas ya que una característica de éste tipo de material es frágil por su forma y por lo tanto es susceptible de quebrarse bajo cargas de tráfico lo que al final puede ocasionar cambios severos en la granulometría y en fin perjudicar a toda la estructura del pavimento.

#### ***d) Limpieza del agregado grueso***

Parámetro o característica muy importante en la cual se manifiesta la necesidad de que el agregado grueso no presente residuos de materias extrañas, materia vegetal, arcilla, etc., que pueden alterar desde la granulometría hasta el normal funcionamiento del pavimento bajo cargas de tráfico. Es por esto que en muchos procesos constructivos se recomienda lavar el material justo antes de su puesta en obra.

#### **2.2.2.2. PROPIEDADES DEL AGREGADO FINO**

Las siguientes características y propiedades son importantes para el uso del agregado fino en mezclas asfálticas:

##### ***a) Procedencia del agregado fino***

“Se recomienda que el agregado fino provenga de material triturado como por ejemplo la piedra de cantera o grava natural en su totalidad o en mayor concentración pudiendo obtenerse también de yacimientos naturales pero tratando de que sea en menores porcentajes que los obtenidos de la trituración, sobre todo si es para pavimentos de primer orden que van a resistir altas cargas de tráfico. En casos más comunes como vías de menor importancia con cargas de tráfico menos intensas se emplea arena de yacimientos naturales para la elaboración de mezclas asfálticas, tratando de especificar claramente la cantidad o proporción máxima de arena natural que no proviene de procesos de trituración y que será utilizada en dichas mezclas; se recomienda una proporción máxima del 10% con respecto a toda la cantidad de agregado combinado; es decir que, el agregado fino natural no debe sobrepasar al agregado fino proveniente de procesos de trituración así sea para pavimentos que corresponden a vías de menor importancia.

Éste control se efectúa para prevenir la pérdida de rigidez en la mezcla aunque por otro lado se con el límite máximo de 10% de agregado fino natural se puede mejorar la manejabilidad y estabilidad de la mezcla.

***b) Limpieza del agregado fino***

Al igual que el agregado grueso, el agregado fino debe estar exento de material extraño, arcilla, material vegetal, marga, entre otros; para preservar la calidad de la mezcla y por ende el buen funcionamiento del pavimento cuando entre en uso continuo. Caso contrario pueden presentarse problemas que parten desde reacciones químicas terminando en pérdidas de estabilidad de la mezcla.

***c) Resistencia a la fragmentación del agregado fino***

Característica íntimamente relacionada con el ensayo de abrasión de los ángeles donde el agregado fino resultante del proceso de abrasión del agregado grueso debe someterse a los procesos propuestos por la norma para así obtener el coeficiente de abrasión y concluir si el material es apto o no para su uso en la mezcla asfáltica en caliente.

En términos generales un agregado fino proveniente de la trituración del agregado grueso tiene mejores características como ya se mencionó por lo que se recomienda su uso.

***d) Adhesividad del agregado fino***

En el caso del agregado fino, la adhesividad está en función de su superficie específica y de la facilidad para retener la humedad.

### **2.2.3. LIGANTES ASFÁLTICOS**

#### **2.2.3.1. GENERALIDADES DEL LIGANTE ASFALTICO**

“Ligante asfáltico es un nombre genérico que incluye a materiales de distinto origen como los asfaltos y los alquitranes, los cuales tienen en común su aspecto y algunas propiedades aglomerantes, entre las principales se puede denotar que ambos son materiales termoplásticos, viscosos, su pigmentación es negra y están formados por una mezcla de hidrocarburos.”

Actualmente en la construcción de carreteras se usa el asfalto, que puede ser de origen natural o artificial el cual es un producto de la refinación del petróleo crudo. En nuestro país, solo poseemos asfalto artificial, el cual es provisto por la empresa estatal Petroecuador ubicada en la provincia de Esmeraldas.

El asfalto tiene muchas aplicaciones en la construcción, en especial en el campo vial, debido a sus propiedades de consistencia, adhesividad, impermeabilidad y durabilidad, lo que lo ha llevado a ser utilizado en mezclas asfálticas, emulsiones asfálticas, riegos de liga e impregnación, entre otros.

La mayoría de los asfaltos son sólidos a temperatura ambiente, por lo que necesitan ser calentados para su manipulación, es decir, reducir su consistencia a un valor admisible para poder utilizarlo ya sea en bombeo, riegos asfálticos, producción de mezclas asfálticas en caliente, entre otros.

#### **2.2.3.2. DEFINICIÓN DEL LIGANTE ASFALTICO.**

Los asfaltos son una mezcla compleja de hidrocarburos de peso molecular elevado, que se presenta en forma de cuerpo viscoso semi-elástico, no cristalino y de color negro. Son productos de la destilación natural o artificial del petróleo. Es el residuo sólido que queda una vez que se hayan extraído los componentes más ligeros y volátiles del hidrocarburo.

Aunque el asfalto puede considerarse como un desecho, también puede verse como un producto de gran calidad, sobre el que se fundamenta gran parte de la construcción de pavimentos flexibles, en virtud de su ductilidad, flexibilidad y tenacidad que los constituye y caracteriza.

### **2.2.3.3. CLASIFICACIÓN DE LOS LIGANTES ASFÁLTICOS.**

Entre la variada gama de tipos de asfalto podemos destacar los siguientes:

#### **2.2.3.3.1. LIGANTE HIDROCARBONADO**

Son productos bituminosos viscosos, preparados a partir de hidrocarburos naturales que poseen propiedades aglomerantes, caracterizando su empleo en las mezclas bituminosas. Su composición es asfalto, alquitrán o una mezcla de los mismos.

#### **2.2.3.3.2. ASFALTO**

Material muy viscoso o casi sólido, virtualmente no volátil, adhesivo e impermeabilizante, derivado del petróleo o de los asfaltos naturales, que es completamente o casi soluble en tolueno.

Dentro de los ligantes derivados del petróleo según la denominación americana, se considera los siguientes tipos de ligantes en función del procedimiento de elaboración y los productos añadidos.

##### **a) Asfaltos para Pavimentación**

Tipo de asfalto empleado para la fabricación de mezclas asfálticas usado básicamente en construcción y mantenimiento de pavimentos.

Los asfaltos de pavimentación se obtienen por reducción directa y progresiva de los residuos derivados de la destilación de los petróleos crudos, o por precipitación de

los asfaltenos, mediante solventes especiales. Los distintos grados de este tipo de asfalto se les diferencian por los valores de la prueba de penetración, ensayo que se lo realiza a una temperatura de 25°C.

**Tabla 2:4** Clasificación Asfalto por Grado de Penetración.

<b>Grado de Penetración</b>	<b>Grado de Viscosidad AC (Asphalt Cement)</b>
40-50	AC-40
60-70	AC-20
85-100	AC-10
120-150	AC-5
200-300	AC-2.5

**Fuente:** norma ASTM D5-97

#### **b) Emulsión De Asfalto**

Una emulsión asfáltica consiste de una dispersión de finas gotas de asfalto, estabilizadas en una fase acuosa, por la presencia de un agente emulsificante, obteniéndose un producto relativamente fluido. Pueden ser usadas sin adición de calor o de solventes, además, pueden ser bombeadas, almacenadas y aplicadas a temperaturas mucho más bajas que con otro tipo de utilización del asfalto.

Básicamente, una emulsión está constituida por asfalto, agua, un emulsificante y en algunos casos, según los requerimientos, cierto tipo de aditivo. Las emulsiones asfálticas, pueden ser utilizadas en una gran variedad de aplicaciones, desde la construcción, mantenimiento y pavimentación de carreteras y aeropuertos, hasta aquellas en las que el objetivo que se persigue es un cubrimiento que actúe como una capa protectora; entre las más importantes se tiene:

- Fabricación de morteros asfálticos para impermeabilización.
- Impermeabilizaciones en viviendas y tableros de puentes.
- Construcción de carpetas de rodamiento.
- Control de erosión de suelos.
- Bacheos.
- Cubrimientos anticorrosivos de tuberías subterráneas.
- Riegos especiales de protección de taludes, canales, obras hidráulicas.
- Riegos de curado, de penetración y de imprimación.
- Estabilización de suelos, lechadas bituminosas, riegos de adherencia.
- Riegos anti polvo en la industria del carbón.

#### **2.2.3.4. PROPIEDADES DE LOS LIGANTES ASFÁLTICOS**

A continuación se detallan las principales propiedades de los ligantes asfálticos que son resultado de ensayos realizados en laboratorio

##### **2.2.3.4.1 DENSIDAD**

“La densidad de los asfaltos que se utilizan en la construcción de pavimentos varía desde 0.9-1.4 kg/dm<sup>3</sup>. Los valores más altos de densidad de un asfalto corresponden a los asfaltos procedentes de crudos con un alto contenido de hidrocarburos

aromáticos. La densidad puede darnos idea de las impurezas que contiene un producto y su medida nos sirve de control de la uniformidad de un suministro.

La densidad relativa de un ligante es la razón entre el peso de un determinado volumen de ligante y el peso de un volumen igual de agua a una determinada temperatura. Su conocimiento permite pasar de pesos a volúmenes o viceversa.

#### **2.2.3.4.2. PENETRACIÓN**

La penetración es una medida de la consistencia del producto asfáltico, que se determina midiendo en décimas de milímetro, la longitud de una aguja normalizada que entra en una muestra en unas condiciones especificadas de tiempo, temperatura y carga.

Esta propiedad, por sí sola, no nos permite identificar un asfalto, pero sí nos define si el producto que está sometido al ensayo es líquido, semisólido o sólido. La penetración de un producto asfáltico disminuye cuando la densidad del mismo aumenta.

#### **2.2.3.4.3. VISCOSIDAD**

La viscosidad es la relación entre la fuerza aplicada a un fluido y la velocidad con la que fluye. Por lo tanto la viscosidad de un ligante es una de sus características esenciales desde el punto de vista de su comportamiento en el momento de su aplicación. La viscosidad de los ligantes hidrocarbonatos depende de la temperatura, por lo que su determinación a diferentes temperaturas da una buena idea de cuál es su susceptibilidad térmica.

El ensayo se basa en la determinación del tiempo en que una cierta cantidad de producto asfáltico a una temperatura prefijada fluye por un orificio por la acción de la gravedad en unas condiciones normalizadas.

Si se somete un fluido a la acción de una fuerza, se produce una deformación de dicho fluido. Pero esta deformación corresponde solamente a parte de la energía aplicada al

fluido. El resto de la energía aplicada se transformará en energía calorífica, debido al frotamiento interno que se produce en el fluido. Cuando éste sea viscoso, esta energía empleada en vencer los frotamientos internos será grande.

#### **2.2.3.4.4. SUSCEPTIBILIDAD TÉRMICA**

La susceptibilidad térmica de un producto asfáltico, es la aptitud que presenta para variar su viscosidad en función de la temperatura. Es muy importante la susceptibilidad debido a que se puede conocer la temperatura adecuada para que el producto asfáltico adquiera la viscosidad requerida para el uso que se le va dar.

Para poner en obra un material asfáltico, se requiere que tenga una viscosidad baja, lo cual puede conseguirse por medio de una disolución en un disolvente volátil, por emulsión en agua o por un aumento en la temperatura, éste último es el procedimiento frecuentemente utilizado.

#### **2.2.3.4.5. DUCTILIDAD**

La ductilidad se mide por el alargamiento, antes de producirse la rotura de una probeta de material asfáltico estirada por sus extremos con una velocidad constante.

Los materiales asfálticos están sometidos frecuentemente a variaciones de temperatura que le provocan cambios dimensionales, para esto es necesario que el material asfáltico tenga suficiente ductilidad para alargarse sin que se produzcan grietas. Una ductilidad excesiva tampoco es conveniente debido a que se corre el riesgo de que se presenten ondulaciones por efectos de las cargas del tráfico.

#### **2.2.3.4.6. PUNTO DE INFLAMACIÓN**

Es la temperatura a la cual arden los vapores del asfalto al aproximar a la superficie del material una llama de prueba. El punto de inflamación de un asfalto debe estar alrededor de los 215 grados centígrados.

## **2.3. DEFINICIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA**

Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua éste. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan. (Kraemer et al., 2004).

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Sin olvidar que se utilizan en las capas inferiores de los firmes para tráficos pesados intensos.

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

### **2.3.1. Clasificación de las Mezclas Asfálticas por la Temperatura de puesta en obra**

#### **a) Mezclas asfálticas en Frío**

El ligante suele ser una emulsión asfáltica (debido a que se sigue utilizando en algunos lugares los asfaltos fluidificados), y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.

#### **b) Mezclas asfálticas en Caliente**

Se fabrican con asfaltos a unas temperaturas elevadas, en el rango de los 140-160 grados centígrados, según la viscosidad del ligante, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores a la ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente.

#### **2.3.1.1. Mezcla Asfáltica en Frío**

Son las mezclas fabricadas con emulsiones asfálticas, y su principal campo de aplicación es en la construcción y en la conservación de carreteras secundarias. Para retrasar el envejecimiento de las mezclas abiertas en frío se suele recomendar el sellado por medio de lechadas asfálticas.

Se caracterizan por su trabajabilidad tras la fabricación incluso durante semanas, la cual se debe a que el ligante permanece un largo periodo de tiempo con una viscosidad baja debido a que se emplean emulsiones con asfalto fluidificado: el aumento de la viscosidad es muy lento en los acopios, haciendo viable el almacenamiento, pero después de la puesta en obra en una capa de espesor reducido, el endurecimiento es relativamente rápido en las capas ya extendidas debido a la evaporación del fluidificante. Existe un grupo de mezclas en frío, el cual se fabrica con una emulsión de rotura lenta, sin ningún tipo de fluidificante, pero es menos usual, y pueden compactarse después de haber roto la emulsión. El proceso de aumento paulatino de la resistencia se le suele llamar maduración, que consiste básicamente en la evaporación del agua procedente de la rotura de la emulsión con el consiguiente aumento de la cohesión de la mezcla.

#### **2.3.1.2. Mezcla Asfáltica en Caliente**

Constituye el tipo más generalizado de mezcla asfáltica y se define como mezcla asfáltica en caliente la combinación de un ligante hidrocarbonado, agregados incluyendo el polvo mineral y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del agregado queden muy bien recubiertas por una película homogénea de ligante. Su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los agregados, y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior a la ambiente.

Se emplean tanto en la construcción de carreteras, como de vías urbanas y aeropuertos, y se utilizan tanto para capas de rodadura como para capas inferiores de los firmes. Existen a su vez subtipos dentro de esta familia de mezclas con diferentes características. Se fabrican con asfaltos aunque en ocasiones se recurre al empleo de asfaltos modificados, las proporciones pueden variar desde el 3% al 6% de betún asfáltico en volumen de agregados pétreos.

### **2.3.2. PROPIEDADES DE LOS LIGANTES Y MEZCLAS ASFÁLTICAS**

Aunque en una mezcla asfáltica, el asfalto sea minoritario en proporción, sus propiedades pueden influir de manera significativa en su comportamiento. El tipo de mezcla será el que, en gran medida, determine la contribución hecha por el ligante sobre todo el conjunto. Generalmente, las propiedades de las mezclas con granulometría continua dependen del enclavamiento o trabazón de los áridos, mientras que las preparadas con altos contenidos de mortero asfáltico dependen más de la rigidez de la proporción de ligante, polvo mineral y arena.

A altas temperaturas de servicio, puede que el ligante llegue a reblandecerse, facilitando la deformación de la mezcla (ahuellamiento). El riesgo de aparición de estas deformaciones es aún mayor en pavimentos sometidos a la circulación de vehículos pesados. De manera generalizada y sin tener en cuenta otros factores que pueden influir, se puede disminuir la probabilidad de aparición de estas deformaciones aumentando la rigidez del ligante mediante el empleo de un asfalto más duro.

Por otro lado a temperaturas de servicios bajas, el ligante se vuelve relativamente rígido y va perdiendo poder de resistencia a las tensiones, volviéndose frágil y siendo susceptible de fisuraciones. El grado de susceptibilidad a la fisuración está relacionado con la dureza del asfalto y su capacidad para absorber las sollicitaciones inducida por el tráfico. Disminuyendo la dureza del asfalto, se minimizará el riesgo de fallo por fragilidad.

Entonces, debido a lo dicho precedentemente a la hora de buscar comportamientos globales satisfactorios de la mezclas bituminosas, la elección del asfalto adecuado para cada tipo de mezclas se vuelve un compromiso entre ambos extremos; ahuellamiento a altas temperaturas y fisuramiento por fragilidad térmica a bajas temperaturas. Donde mejorando el comportamiento a altas temperaturas, se influye negativamente en el comportamiento a bajas temperaturas.

#### **2.4. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS**

El diseño de mezclas asfálticas, así como el diseño de otros materiales de ingeniería, consiste principalmente en seleccionar y hacer proporciones de los componentes, para obtener las propiedades deseadas o especificadas en la construcción. El objetivo general para el diseño de mezclas asfálticas, es el determinar cada componente de la mezcla asfáltica, y el asfalto que resulte en una mezcla económica que tenga:

Suficiente asfalto para asegurar durabilidad.

Suficiente estabilidad para satisfacer las demandas de tráfico sin distorsión o desplazamientos.

Suficiente manejabilidad para permitir la colocación de la mezcla sin segregación.

Los materiales propuestos a usarse satisfagan los requisitos de las especificaciones del proyecto.

Las combinaciones de agregados satisfagan la granulometría requerida en las especificaciones.

Las gravedades específicas de masa de todos los agregados usados y la gravedad específica del asfalto sean determinados para poderse usar en los análisis de densidad y vacíos.

Estos requerimientos son materia de pruebas de rutina, especificaciones y técnicas de laboratorio que deben ser considerados, pero que no son técnicas para cualquier método de diseño en particular. Por lo que existen varios Métodos de Diseño de Mezclas, en nuestro caso solo hablaremos del método MARSHALL que por su accesibilidad a los equipos y por ser el más usado en el país.

## **2.5. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL**

### **2.5.1. INTRODUCCIÓN**

“En una mezcla asfáltica en caliente de pavimentación, el asfalto y el agregado son combinados en proporciones exactas: Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el desempeño de la misma como pavimento terminado.” (Asphalt Institute MS-22, 2009)

Una de las virtudes del método Marshall es la importancia que se asigna a las propiedades densidad/vacíos del material asfáltico. Este análisis garantiza que las relaciones volumétricas de los componentes de la mezcla estén dentro de rangos adecuados para asegurar una mezcla durable. Desafortunadamente una de sus grandes desventajas es el método de compactación de laboratorio por impacto el cual no simula la densificación de la mezcla que ocurre bajo tránsito en un pavimento real.

### **2.5.2. CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO DE LA MEZCLA**

Una briqueta preparada en el laboratorio puede ser analizada para determinar su posible desempeño en la estructura del pavimento. El análisis está enfocado hacia

cuatro características de la mezcla, y la influencia que estas puedan tener en el comportamiento de la mezcla:

- Densidad de la mezcla
- Vacíos de aire
- Vacíos en el agregado mineral
- Contenido de asfalto

#### **2.5.2.1. DENSIDAD**

La densidad de la mezcla compactada está definida como la masa de un volumen específico de la mezcla. La densidad es una característica muy importante debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero.

La densidad obtenida en el laboratorio se convierte en la densidad patrón, y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es, o no, adecuada. Las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad del laboratorio. Esto se debe a que rara vez la compactación in situ logra las densidades que se obtienen usando los métodos normalizados de compactación de laboratorio.

#### **2.5.2.2. VACÍOS DE AIRE**

“Son espacios pequeños de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente

graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios adonde pueda fluir el asfalto durante su compactación adicional. El porcentaje permitido de vacíos de aire (en muestras de laboratorio) para capas de base y capas superficiales está entre 3 y 5 por ciento, dependiendo del diseño específico.”

La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos. La razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona espacios, a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire, y causar deterioro. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie.

La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta la densidad menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa.

### **2.5.2.3. VACÍOS EN EL AGREGADO MINERAL**

“Los vacíos en el agregado mineral (VMA) son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compactada, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.” (Asphalt Institute MS-22, 2009)

El VMA representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que es absorbida por el agregado) y el volumen de vacíos necesario en la mezcla. Cuando mayor sea el VMA más espacio habrá disponible para el asfalto. Existen valores mínimos para VMA los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos valores se basan en el hecho de que cuanta más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durable será la mezcla.

Cuando se obtengan valores de VMA por debajo del mínimo especificado, puede resultar en películas delgadas de asfalto y en mezclas de baja durabilidad y apariencia seca. Por lo tanto, es contraproducente y perjudicial, para la calidad del pavimento, disminuir el VMA para economizar el contenido de betun.

#### 2.5.2.4. CONTENIDO DE BETUN

El contenido óptimo de Betun de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado tales como la granulometría y la capacidad de absorción. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo del asfalto. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área específica total, y mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir, uniformemente, todas las partículas. Por otro lado las mezclas más gruesas (agregados más grandes) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área específica total.

La relación entre el área superficial del agregado y el contenido óptimo de asfalto es más pronunciada cuando hay relleno mineral (fracciones muy finas de agregado que pasan a través del tamiz de 0.075 mm (Nº 200)). Los pequeños incrementos en la cantidad de relleno mineral, pueden absorber, literalmente, gran parte el contenido de asfalto, resultando en una mezcla inestable y seca. Las pequeñas disminuciones tienen el efecto contrario: poco relleno mineral resulta en una mezcla muy húmeda. Cualquier variación en el contenido o relleno mineral causa cambios en las propiedades de la mezcla, haciéndola variar de seca a húmeda. Si una mezcla contiene poco o demasiado, relleno mineral, cualquier ajuste arbitrario, para corregir la situación, probablemente la empeorará.

La capacidad de absorción del agregado usado en la mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto. Esto se debe a que se tiene que agregar suficiente asfalto a la mezcla para permitir absorción, y para que además se puedan cubrir las partículas con una película adecuada de asfalto. En función de la absorción tenemos dos tipos de asfalto: contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto.

- ***El contenido total de betun:*** es la cantidad de betun que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla.

- ***El contenido efectivo de betun:*** es el volumen de betun no absorbido por el agregado, es decir, es la cantidad de betun que forma una película ligante efectiva sobre la superficie de los agregados. El contenido efectivo de betun se obtiene al restar la cantidad absorbida de betun del contenido total de betun.

### **2.5.3. PROPIEDADES CONSIDERADAS EN EL DISEÑO DE MEZCLAS**

Las buenas mezclas asfálticas en caliente trabajan bien debido a que son diseñadas, producidas y colocadas de tal manera que se logra obtener las propiedades requeridas por la norma ASTM D6927-06 para el diseño Marshall.

El objetivo primordial del procedimiento de diseño es el de garantizar que la mezcla posea cada una de estas propiedades. Por lo tanto, hay que saber que significa cada una de estas, cómo es evaluada, y que representa en términos de rendimiento del pavimento.

#### **2.5.3.1. ESTABILIDAD**

La estabilidad de un asfalto es su capacidad de resistir desplazamientos y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas, un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos (canales), ondulaciones (corrugación) y otras señas que indican cambios en la mezcla. Los requisitos de estabilidad solo pueden establecerse después de un análisis completo del tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad para un pavimento dependen del tránsito esperado.

Valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido y, por lo tanto, menos durable que lo deseado. La estabilidad de una mezcla depende de la fricción y la cohesión interna.

La fricción interna en las partículas de agregado está relacionada con características del mismo tales como forma y textura superficial. La cohesión resulta de la capacidad ligante del asfalto. Una relación adecuada de fricción y cohesión interna previene que

las partículas de agregado se desplacen unas respecto a otras debido a las fuerzas ejercidas por el tráfico.

La fuerza ligante de la cohesión se incrementa con aumentos en la frecuencia de carga.

La cohesión también aumenta a medida que la viscosidad del betun aumenta, o a medida que la temperatura del pavimento disminuye. La cohesión está en función del contenido de betun.

Cuando se sobrepasa el contenido de betun óptimo se produce una película demasiado gruesa sobre las partículas de agregado, lo cual resulta en pérdida de fricción entre partículas.

**Tabla 2:5** Causas Y Efectos De Mala Estabilidad

CAUSAS	EFFECTOS
Exceso de asfalto en la mezcla	Ondulaciones, ahuellamientos y afloramiento o exudación.
Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla	Baja resistencia durante la compactación y posteriormente, durante un cierto tiempo; dificultad para la compactación.
Agregado redondeado sin, o con pocas, superficies trituradas	Ahuellamiento y canalización.

**Fuente:** norma ASTM D8-06

### 2.5.3.2. DURABILIDAD

La durabilidad de un pavimento es su capacidad para resistir factores tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades de betún, y separación de las películas de betún. Estos factores pueden ser el resultado de la acción del clima, tránsito o una combinación de ambos.

Generalmente, la durabilidad de una mezcla puede ser mejorada en tres formas:

- Usando la mayor cantidad posible de betún.

- Usando una graduación densa de agregado resistente a la separación.
- Diseñando y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad.

Al usar la mayor cantidad posible de betún aumenta la durabilidad porque las películas gruesas de betún no se envejecen o endurecen tan rápido como lo hacen las películas delgadas. En consecuencia, el betún retiene, por más tiempo, sus características originales. Además se sella eficazmente un gran porcentaje de vacíos interconectados en el pavimento, haciendo difícil la penetración del aire y del agua. Se debe dejar un cierto porcentaje de vacíos en el pavimento para permitir la expansión del betún en los tiempos cálidos y evitar la exudación del mismo.

Una graduación densa de agregado firme, duro a la separación, contribuye de tres maneras a la durabilidad del pavimento. Proporciona un contacto más cercano entre las partículas del agregado, lo cual mejora la impermeabilidad de la mezcla. Un agregado firme y duro resiste la desintegración bajo las cargas del tránsito. Un agregado resistente a la separación resiste la acción del agua y el tránsito, las cuales tienden a separar la película de betún de las partículas de agregado.

La intrusión del aire y agua en el pavimento puede minimizarse si se diseña y compacta la mezcla para darle al pavimento la máxima impermeabilidad posible. Existen muchas causas y efectos con una poca durabilidad del pavimento.

**Tabla 2:6** Causas y Efectos De Una Poca Durabilidad

CAUSAS	EFECTOS
Bajo contenido de asfaltos	Endurecimiento rápido del asfalto y desintegración por pérdida de agregado
Alto contenido de vacíos debido al diseño o la falta de compactación	Endurecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración
Agregados susceptibles al agua	Películas de asfalto se desprenden del agregado dejando un pavimento desgastado, o desintegrado.

**Fuente:** norma ASTM D9-06

### 2.5.3.3. IMPERMEABILIDAD

La impermeabilidad de un pavimento es la resistencia al paso de aire y agua hacia su interior, o a través de él. Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada. Aunque el contenido de vacíos es una indicación del paso potencial de aire y agua a través de un pavimento, la naturaleza de estos vacíos es más importante que su cantidad.

El grado de impermeabilidad está determinado por el tamaño de los vacíos, sin importar si están o no conectados, y por el acceso que tienen a la superficie del pavimento. Aunque la impermeabilidad es importante para la durabilidad de las mezclas compactadas, virtualmente todas las mezclas asfálticas usadas en la construcción de carreteras tienen cierto grado de permeabilidad. Esto es aceptable, siempre y cuando la permeabilidad esté dentro de los límites especificados.

**Tabla 2:7** Causas y Efectos De Permeabilidad Defectuosa

CAUSAS	EFECTOS
Bajo contenido de asfalto	Las películas delgadas de asfalto causaran tempranamente, un envejecimiento y una desintegración de la mezcla.
Alto contenido de vacíos en la mezcla de diseño.	El agua y el aire pueden entrar fácilmente en el pavimento, causando oxidación y desintegración de la mezcla.
Compactación inadecuada.	Resultará en vacíos altos en el pavimento, lo cual conducirá a la infiltración de agua y baja estabilidad.

**Fuente:** norma ASTM D9-06

#### **2.5.3.4. FLEXIBILIDAD**

Flexibilidad es la capacidad de un pavimento asfáltico para acomodarse, sin que se agriete, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante. La flexibilidad es una característica deseable en todo pavimento asfáltico, debido a que virtualmente todas las subrasantes se asientan bajo cargas o se expanden por acción del suelo. Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de betún es, generalmente más flexible que una mezcla densamente graduada y bajo contenido de betún.

#### **2.5.3.5. RESISTENCIA A LA FATIGA**

Es la resistencia a flexión repetida bajo cargas de tránsito. Se ha demostrado, por medio de investigación, que los vacíos y la viscosidad del asfalto tienen un efecto considerable sobre la resistencia a la fatiga. A medida que el porcentaje de vacíos en un pavimento aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento disminuye. Así mismo, un pavimento que contiene asfalto que se ha envejecido y endurecido considerablemente tiene menor resistencia a la fatiga.

**Tabla 2:8** Causas y Efectos De Una Mala Resistencia a la Fatiga

<b>CAUSAS</b>	<b>EFFECTOS</b>
Bajo contenido de asfalto	Agrietamiento por fatiga
Vacíos altos de diseño	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga.
Falta de compactación	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga.
Espesor inadecuado de pavimento	Demasiada flexión seguida por agrietamiento por fatiga.

**Fuente:** norma ASTM D10-06

#### 2.5.4. CRITERIOS DE DISEÑO NORMALIZADOS

Para el diseño de mezclas asfálticas, deben cumplir con la caracterización mediante ensayos establecidos por las normas AASHTO y ASTM, como se muestra en las siguientes tablas:

*Tabla 2.9: Ensayos de laboratorio Normalizados para Agregados*

Ensayo de laboratorio para AGREGADOS	Norma	Propósito
Granulometría	AASHTO T 27 ASTM C 136	La determinación de la composición granulométrica de un material pétreo que se pretende emplear en la elaboración de la carpeta asfáltica es de primordial importancia porque en función de ellas se conoce de ante mano qué clase de textura tendrá la carpeta.
Desgaste	AASHTO T 96 ASTM C 131	EL objeto es conocer la calidad del material pétreo desde el punto de vista de su desgaste, ya sea por el grado de alteración del agregado, o por la presencia de planos débiles y aristas de fácil desgaste. Esta característica esencial cuando el agregado va a estar sujeto a desgaste por abrasión como en el caso de los pavimentos. Es la medida de dureza de los agregados y nos da una idea de la forma en la que se comportarán los agregados, bajo los efectos de la abrasión causada por el tráfico además de la idea del grado de intemperismo que poseen los agregados.
Sanidad usando Sulfato de Sodio	AASHTO T 104 ASTM C 88	Permite obtener la información de estabilidad de un agregado bajo la acción de agentes atmosféricos. Los agregados inestables (se disgregan ante la presencia de condiciones atmosféricas desfavorables) resultan evidentemente insatisfactorios como agregados para mezcla en rodadura en pavimentos, especialmente cuando éstos tendrán una gran porción de su superficie expuesta a los agentes atmosféricos, el valor del error permisible no debe ser mayor de 0.5%.

*Fuente: The Asphalt Institute.*

*Tabla 2.3: Ensayos de laboratorio Normalizados para Asfaltos*

Ensayo de laboratorio para ASFALTOS	Norma	Propósito
Viscosidad	AASHTO 201. ASTM D 2170	En el diseño de mezclas asfálticas, las temperaturas de mezclado y compactación se definen en función de la viscosidad que posee el Cemento asfáltico, ya que la trabajabilidad de una mezcla asfáltica, se ve influenciada por la trabajabilidad que el asfalto tenga dentro de esta misma a una temperatura determinada de trabajo. Este ensayo se usa para clasificar los Cementos Asfálticos a Viscosidad 60°. Mide la consistencia de los Cementos Asfálticos
Penetración	AASHTO T 49 ASTM D 5	Clasifica los asfaltos en grados según su dureza o consistencia medida en décimas de milímetros. Valores altos de penetración, indicarán consistencias suaves.
Punto de Inflamación	AASHTO T 48 ASTM D 92	Tiene por propósito, identificar la temperatura a la cual el asfalto puede ser manejado y almacenado sin peligro que se inflame. El punto de inflamación se mide por el ensayo en copa abierta Cleveland.
Ductilidad	AASHTO T 51 ASTM D 113	Provee de una medida de las propiedades al estiramiento de los cementos asfálticos y el valor resultante puede ser usado como criterio de aceptación del material asfáltico ensayado. Se considera la ductilidad como la capacidad que tiene el asfalto de resistir esfuerzos de estiramiento bajo condiciones de velocidad y temperatura especificada.
Punto de reblandecimiento	AASHTO T 53 ASTM D 36	La temperatura determinada como de Reblandecimiento, representa aquella a la cual un cemento asfáltico alcanzará un determinado estado de fluidez, existiendo consecuentemente una pérdida de consistencia del mismo. El punto

*Fuente: The Asphalt Institute.*

**Fuente:** Norma AASHTO y ASTM

#### **2.5.4.1. Requisitos del agregado pétreo**

*Tabla 2.10: Requisitos de calidad del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa.*

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Densidad relativa, mínimo	2,4
Desgaste de los ángeles, %	35
Partículas alargadas y lajeadas, % máximo	40
Equivalente de arena, % mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua, % máximo	25

Fuente: SCT, 2003.

Tabla 2.11: Requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa.

Malla		Tamaño				
Abertura mm	Designación	12.5 mm (1/2 ")	19 mm (3/4 ")	25 mm (1 ")	37,5 mm (1 1/2 ")	50 mm (2 ")
50	2"	---	---	---	---	---
37,5	1 1/2"	---	---	---	100	90-100
25	1"	---	---	100	90-100	76-90
19	3/4"	---	100	90-100	79-92	66-83
12,5	1/2"	100	90-100	76-89	64-81	53-74
9,5	3/8"	90-100	79-92	67-82	56-75	47-68
6,3	1/4"	76-89	66-81	56-71	47-65	39-59
4,75	No.4	68-82	59-74	50-64	42-58	35-53
2	No.10	48-64	41-55	36-64	30-42	26-38
0,85	No.20	33-49	28-42	25-35	21-31	19-28
0,425	No.40	23-37	20-32	18-27	15-24	13-21
0,25	No.60	17-29	15-25	13-21	11-29	9-16
0,15	No.100	12-21	11-18	9-16	8-14	6-12
0,075	No.200	7-10	6-9	5-8	4-7	3-6

Fuente: SCT, 2003.

#### 2.5.4.2. Requisitos del ligante asfáltico

Tabla 2.12: Requisitos de calidad para cemento asfáltico, clasificado por viscosidad dinámica a 60°C.

Características	Clasificación			
	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30
Del cemento original	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30
Viscosidad dinámica a 60°C; Pa.s(P <sup>[1]</sup> )	50 ± 10 (500 ± 100)	100 ± 20 (1 000 ± 200)	200 ± 40 (2 000 ± 400)	300 ± 60 (3 000 ± 600)
Viscosidad cinemática a 135°C; mm <sup>2</sup> /s, mínimo (1 mm <sup>2</sup> /s = 1 centistoke)	175	250	300	350
Viscosidad Saybolt-Furol a 135 °C; s, mínimo	80	110	120	150
Penetración a 25°C, 100 g, 5s; 10 <sup>-1</sup> mm, mínimo	140	80	60	50
Punto de inflamación Cleveland; °C, mínimo	177	219	232	232
Solubilidad, %, mínimo	99	99	99	99
Punto de reblandecimiento, °C	37-43	45-52	48-56	50-58

*Fuente: SCT, 2005.*

## **2.6. DEFINICIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET)**

Las propiedades de las mezclas asfálticas convencionales pueden ser modificadas para mejorar sus características de Estabilidad y Fluidez. Hay casos en los cuales las mezclas asfálticas presentan problemas al no generar la resistencia adecuada frente a cargas producidas por el tráfico y la acción del clima. Para tratar de solucionar los problemas mencionados anteriormente, se ha optado la técnica para modificar las propiedades de las mezclas asfálticas, mediante la implementación de materiales polímeros (PET) que colaboren con los problemas estructurales y que sean amigables con el medio ambiente.

Entre los factores fundamentales que han contribuido al desarrollo de estas técnicas merecen destacarse las siguientes:

La crisis energética causante de los significativos aumentos en los precios de los productos derivados del petróleo.

El progresivo agotamiento de las fuentes de obtención de los agregados pétreos de adecuada calidad y el incremento de sus precios en canteras.

A estos aspectos debe adicionarse la influencia notable de los costos del transporte cuando los agregados pétreos de calidad se encuentran a considerable distancia de las obras. Factor considerado de significativo peso en los análisis de precios de las obras. Con respecto al Medio Ambiente, se podría ayudar mucho a mantener el mismo al reciclar productos plásticos y darles un uso técnico en el diseño de mezclas asfálticas ya que la contaminación provocada por desechos plásticos es crítica en el país y de acuerdo con información de prensa se produce 54 Ton/año de las cuales solo se reciclan un 14%.

La crítica disponibilidad de los recursos económicos destinados a proyectos nuevos o su influencia para hacer frente a la continua y efectiva conservación, rehabilitación y reconstrucción de los sistemas viables existentes.

### **2.6.1 CAMPOS DE APLICACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS ADICIONANDO PET**

La adición de PET en mezclas asfálticas puede emplearse en aquellos casos en que las fallas pueden atribuirse a:

Elevada rigidez del ligante asfáltico, como consecuencia de su envejecimiento por acción del tiempo.

Desprendimiento de los agregados ocasionado por una falla de adherencia con el asfalto o bien por el envejecimiento del mismo.

Deformaciones plásticas que producen ahuellamiento, ondulaciones, corrimientos, etc. Esto es atribuible, principalmente, a mezclas con baja estabilidad.

Fisuras y grietas ocasionadas por fatiga de la carpeta asfáltica (piel de cocodrilo) o bien por contracción producida por efectos térmicos (fisuramiento transversal).

### **2.6.2. FUNDAMENTOS DE LA TÉCNICA DE ADICION DEL PET EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS**

Mejorar las características de estabilidad y fluidez de las mezclas asfálticas es el primer campo de aplicación de las técnicas de adicionar PET en las mezclas asfálticas. Para ello se mencionaran algunas propiedades del PET.

- Alta resistencia al desgaste.
- Muy buen coeficiente de fricción.
- Buena resistencia térmica, los poliésteres normales resisten temperaturas de hasta 170°C antes de perder sus propiedades mecánicas.
- Muy buena barrera a CO<sub>2</sub>, aceptable barrera a O<sub>2</sub> y humedad.
- Buena relación costo / beneficio.
- Se encuentra ranqueado como N° 01 en reciclado.
- Liviano.
- La calidad del material reciclado de PET es un concepto importante a considerar depende de los siguientes factores:
  - PET transparente tiene mayor acogida en el proceso de reciclaje ya que al carecer de pigmentos contaminantes facilita los procesos.
  - El PET tiene que estar libre de impurezas, como ser materia orgánica.

## **2.7. NORMATIVA A UTILIZAR EN EL PROYECTO DE EXPERIMENTACIÓN**

Los ensayos de caracterización se realizarán según correspondan en el “*MANUAL DE ENSAYOS DE SUELOS Y MATERIALES – ASFALTO; VOLUMEN 4*”

*Para cementos asfálticos convencionales:*

- Método para determinar la Viscosidad (ASTM D 2170 AASHTO T201-01)
- Método de ensayo de Penetración (ASTM D5 AASHTO T49-97)
- Método para determinar los Puntos de inflamación y combustión mediante la Copa abierta de Cleveland (ASTM D1310-01 AASHTO T79-96)
- Método para determinar la Ductilidad (ASTM D113 AASHTO T51-00)
- Método para determinar el Punto de Ablandamiento mediante el aparato de anillo y bola. (ASTM D36 AASHTO T53-96)
- Método para determinar la gravedad específica (AASHTO T228)

Para agregados:

- Análisis granulométrico por tamizado (ASTM D422 AASHTO T88)
- Determinación del peso específico de los suelos (ASTM D854 AASHTO T100)
- Método para determinar el desgaste mediante la máquina de los ángeles (ASTM E131 AASHTO T96-99)
- Método para determinar el equivalente de arena. (ASTM D2419)

### **CAPÍTULO III**

#### **PREPARACION DE MATERIALES PARA LA INVESTIGACION DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET) AL ASFALTO CONVENCIONAL**

##### **3.1. SELECCIÓN DE MATERIALES**

###### **3.1.1. Material Reciclado PET**

El material PET será reciclado proveniente de los diversos productos de gaseosas y agua mineral que se encuentran en el mercado local, una vez obtenido este producto

previa selección de los mismos se procederá al lavado para remover impurezas como también la extracción de sus etiquetas y al triturado manual para obtener distintos tamaños y en forma de fibra.

Una vez obtenido el material triturado se procederá al tamizado del PET utilizando los tamices # 3/8, #4, #10 y # 40. Las cantidades de PET se lo hizo en función de un contenido óptimo de Betun del 6% de la mezcla asfáltica.

*Tabla 3.1: Botellas recicladas*

Ensayos	PET dispuesta en Fibra	PET Triturado pasante tamiz # 3/8 y retenido tamiz #4	PET Triturado pasante tamiz #10 y retenido tamiz 40
Cantidad de ensayos para distintos porcentajes de PET (3, 5, 10, 15 y 20%)	30	30	30
Cantidad de material PET por ensayo (gr)	50	50	50
<b>TOTAL DE MATERIAL PET (gr)</b>	<b>1500</b>	<b>1500</b>	<b>1500</b>
<b>NUMERO DE BOTELLAS UTILIZADAS</b>	<b>75</b>	<b>75</b>	<b>75</b>

Elaboración propia

### 3.1.2. Materiales de Aporte Betun

Los materiales a utilizar deben cumplir ciertas especificaciones de las Normas ASTM y AASHTO. Para el presente proyecto utilizamos materiales existentes en la ciudad de Tarija que se ajustan dentro de las normativas vigentes; Además de tener una disponibilidad.

Betún como ligante asfáltico C.A. 85-100 con nombre Betunel de procedencia Brasileira, también proporcionado por la misma institución; siendo los mismos analizados en laboratorio de Suelos, Hormigones y Asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Imagen 3.1: Especificaciones del Betún.

 <b>BETUNEL</b> INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA				
<b>CERTIFICADO DE QUALIDADE DE PRODUTO ACABADO</b> (CÓPIA) <span style="float: right;">Nº 663/2014</span>				
<b>PRODUTO: CAP 85/100 (Exportação)</b> DATA DO CARREGAMENTO: 24/10/14 CLIENTE: MERCANTIL LEON SRL DESTINO: SANTA CRUZ LA SIERRA - BOLIVIA VEÍCULO PLACA: HRG-3197/HTE-9641 MUNICÍPIO: CORUMBÁ HORA: TRANSPORTADOR: SAP TRANSPORTES INTERNACIONAIS LTDA OBS: MOT. HELIO NEY SOARES COSTA		QUANTIDADE: 27900 Kg C. PROVA FAB/CLI: 103790 / N. FISCAL Nº: 6356 ESTADO: MS TQ.: 4 TEMPERATURA: 25 °C		
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Formulario C-1 (Llenado por la Entidad) - ENSAYOS DE VERIFICACION DE CALIDAD DEL MATERIAL SOLICITADON (ENSAYOS AASHTO)	LIMITES	MÉTODO	REPRODU- TIBILID.(*)	ENCONTRADAS
Penetracion a 25 °C, 100 gr, 0,1 mm (T – 201)	85 a 100	NBR-6576 / ASTM D5 / AASHTO T201	± 4 dmm	91
Viscosidad Saybolt Furol a 135 °C seg. (T – 72)	85 mín.	NBR-14950 / ASTM D98 / AASHTO T72	± 2%	120
Ensayo de la Mancha @20% Xilol (T -102)	Negativo	- / ASTM D2170 / AASHTO T102	ND	negativo
Punto de Ablandamiento °C (T – 53)	43 a 46	NBR-6560 / ASTM D36 / AASHTO T53	± 3 °C	45
Ductilidad a 25 °C 5 cm/min, cm (T – 51)	100 mín.	NBR-6293 / ASTM D113 / AASHTO T51	consultar NBR	> 100
VISCOSIDADE BROOKFIELD A 135°C, cP	214 mín.	NBR-15184 / ASTM D4402 / AASHTO T316	ND	290
VISCOSIDADE BROOKFIELD A 150°C, cP	97 mín.	NBR-15184 / ASTM D4402 / AASHTO T316	ND	152
VISCOSIDADE BROOKFIELD A 177°C, cP	28 a 114	NBR-15184 / ASTM D4402 / AASHTO T316	ND	58
TEMPERATURA DE MISTURA, °C (**) (***)	INDICATIVO	CÁLCULO	ND	141 a 147
TEMPERATURA DE COMPACTAÇÃO, °C (**) (***)	INDICATIVO	CÁLCULO	ND	130 a 136
Índice de Penetración de Pfeiffer	-1,5 a 0,5	CÁLCULO / CÁLCULO	ND	-1,1
Punto de Inflamación C.D.C. °C (T – 48)	230 mín.	NBR-11341 / ASTM D92 / AASHTO T48	± 16 °C	> 235
Solubilidad en Tricloroetileno (T-44)	99 mín.	NBR-14855 / ASTM D2042 / AASHTO T44	± 0,26%	99,9
Densidad a 25 °C c/25 °C (T – 226)	0,99 mín.	NBR-6296 / AASHTO T226	± 0,005	1,012
ENSAYOS SOBRE EL RESIDUO PELICULA DELGADA (TFOT), 32 mm, 163°C (AASHTO T246)				
(R)TFOT - Pérdida de Masa (T - 240)	1 máx.	NBR-15235 / ASTM D2672 / AASHTO T240	consultar NBR	0,41
(R)TFOT - Penetración del Residuo, % de la penetración orig	50 mín.	CÁLCULO	ND	55
(R)TFOT - Pérdida por Calentamiento (T-179), %	1 máx.	CÁLCULO / AASHTO T-179	± 4 dmm	0,42
Densidad a 25 °C c/25 °C (T – 226)	1 a 1,05	NBR-6296 / AASHTO T226	± 0,005	1
Observações: ND - Não Determinado; NA - Não Aplicável				

Fuente: Especificaciones técnicas proporcionadas por el Municipio

### 3.1.3. CARACTERIZACIÓN DEL BETUN

Tabla 3.2: Tabla de resultados la caracterización del betun

	<b>UNIVERSIDAD AUTONOMA JUAN MISAE SARACHO</b> FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFIA Y VIAS DE COMUNICACIÓN CARRERA DE INGENIERIA CIVIL(TARIJA-BOLIVIA) <b>CARACTERIZACIÓN DEL BETUN</b>	
	<b>PROYECTO: "EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA ASFALTICA ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET TIPO I)"</b>	
	BETUN: PROCEDENCIA BRAZIL	MUESTRA: N°1

FECHA 07 DE ABRIL 2016
LABORATORISTA: GONZALO ESTEBAN CHOQUE PALACIOS PROYECTO DE GRADO II

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Peso Específico	grs./cm <sup>3</sup>	1.003	1.013	1.008	1.008	1	1.05
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	>280	>290	>295	>288	>232	-
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm.	115	105	107	109	75	-
Penetración a 25°C, 100s. 5seg.(0.1mm) AASHTO T-49	Promedio mm.	93	95	95	95	85	100
Viscosidad Cinemática 135 °C	mm <sup>2</sup> /s	325	297	318	313	250	-
Punto de ablandamiento	°C	44.0	47.0	43.0	45	42	53

Haciendo un análisis de la tabla 3:2 se puede observar que los valores obtenidos de los diferentes ensayos cumplen con las especificaciones técnicas solicitadas por la norma AASHTO y ASTM

### PESO ESPECÍFICO

Al ver nuestro resultado promedio podemos indicar que el betun se encuentra dentro de los rangos establecidos por norma (1-1.05)

### PUNTO DE INFLAMACION

Al observar nuestros ensayos el punto de inflamación sobrepasa el valor mínimo por norma, lo que significa que nuestro Betun tiene las características adecuadas para aguantar combustión

### **DUCTILIDAD**

Como podemos apreciar el ensayo de ductilidad nos proporciona una medida promedio de 109 cm lo que nos indica que el betun para este proyecto tiene buenas propiedades tensores

### **PENETRACION**

Como se puede apreciar en los datos obtenidos la penetración a una temperatura de 25°C se encuentra entre los rangos establecidos por la norma ASTM D-946 para un betun para climas cálidos y templados.

### **VISCOSIDAD**

Según establecido por la norma ASTM D-946 la viscosidad cinemática mínima a 135°C es de 250mm<sup>2</sup>/s por lo que nuestro resultado obtenido esta dentro de este parámetro

### **PUNTO DE ABLANDAMIENTO**

Nuestro resultado promedio nos indica que el betun se encuentra dentro del rango de las especificaciones por normativa lo que establece buena uniformidad y es indicativo de la tendencia del material a fluir en temperaturas elevadas encontradas en servicio.

## **3.2 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN PARA EL AGREGADO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA.**

El material pétreo, está situado en la comunidad de San Mateo, donde se encuentra ubicada una chancadora para la provisión de material para la Alcaldía del Municipio de Tarija de la Provincia Cercado.

### 3.2.1 CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS

#### 3.2.1.1 GRANULOMETRÍA

Tabla 3.3: Tabla de resultados de la granulometría

	<b>UNIVERSIDAD AUTONOMA JUAN MISAEL SARACHO</b> FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFIA Y VIAS DE COMUNICACIÓN CARRERA DE INGENIERIA CIVIL(TARIJA-BOLIVIA) <b>GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO</b>	
	<b>PROYECTO: "EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA ASFALTICA ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET TIPO I)"</b>	
	GRANULOMETRIA	MUESTRA: N°1

FECHA 15 DE ABRIL 2016
LABORATORISTA: GONZALO ESTEBAN CHOQUE PALACIOS PROYECTO DE GRADO II

	GRANULOMETRIA	PESO ESPECIFICO Y % DE ABSORCION				DESGASTE DE LOS ANGELES	EQUIVALENTE DE ARENA
	MOD. FINURA	A GRANEL (gr/cm <sup>3</sup> )	SAT.CON SUP.SECA (gr/cm <sup>3</sup> )	APARENTE (gr/cm <sup>3</sup> )	%ABSORCION (gr/cm <sup>3</sup> )	%PORCENTAJE DE DESGASTE	% DE ARENA
GRAVA	7.93	2.46	2.54	2.69	3.54	27.65	
GRAVILLA	6.94	2.46	2.52	2.61	2.32	22.64	
ARENA	2.89	2.62	2.64	2.66	0.58		90.92

#### 3.2.1.1.1. Granulometría del agregado Grueso

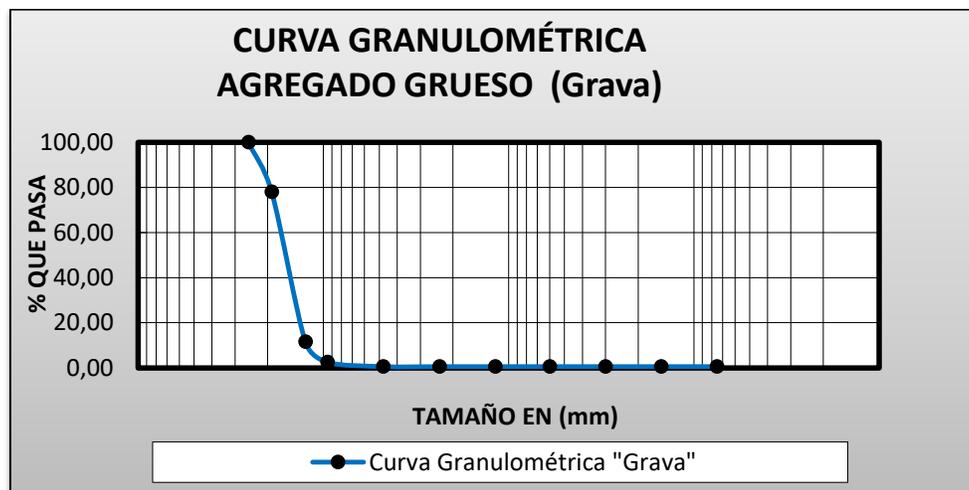
Tabla 3.4: Tabla de resultados de lo granulometría del agregado grueso (Grava)

Peso Total (gr.) 5000			
Tamices	tamaño	Peso Ret.	% que pasa
	(mm)		del total

1"	25.4	0.00	100.00
3/4"	19.0	1099.00	78.02
1/2"	12.5	3323.50	11.55
3/8"	9.50	449.70	2.56
Nº4	4.75	98.20	0.59
Nº8	2.36	0.40	0.58
Nº16	1.18	0.00	0.58
Nº30	0.60	0.00	0.58
Nº50	0.30	0.00	0.58
Nº100	0.15	0.00	0.58
Nº200	0.075	0.00	0.58
BASE	-	23.90	0.11
SUMA		<b>4994.7</b>	
PÉRDIDAS		<b>5.3</b>	
MF		<b>7.93</b>	

De los resultados obtenidos se puede concluir que el material grueso tiene un porcentaje mínimo de desprendimiento de partículas finas; esto se buscó al inicio del diseño mediante el lavado del material para que no se afecte la granulometría de la mezcla.

Figura 3.1: Curva Granulométrica del agregado grueso (Grava)



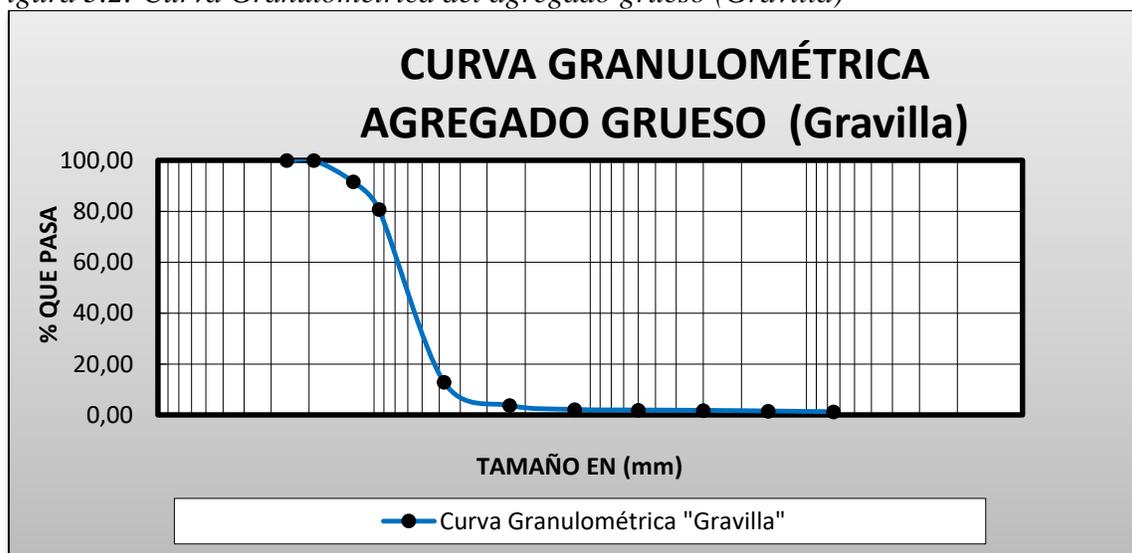
### 3.2.1.1.2. Granulometría del agregado medio (Gravilla)

Tabla 3.5: Tabla de resultados de lo granulometría del agregado grueso (Gravilla)

Peso Total (gr.)	5000
------------------	------

Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	% que pasa del total
1"	25.4	0.00	100.00
3/4"	19.0	0.00	100.00
1/2"	12.5	421.68	91.57
3/8"	9.50	545.28	80.66
N°4	4.75	3389.67	12.87
N°8	2.36	459.83	3.67
N°16	1.18	78.17	2.11
N°30	0.60	11.17	1.88
N°50	0.30	6.45	1.76
N°100	0.15	12.67	1.50
N°200	0.075	14.67	1.21
BASE	-	59.50	0.02
SUMA		4999.1	
PÉRDIDAS		0.9	
MF		6.94	

Figura 3.2: Curva Granulométrica del agregado grueso (Gravilla)



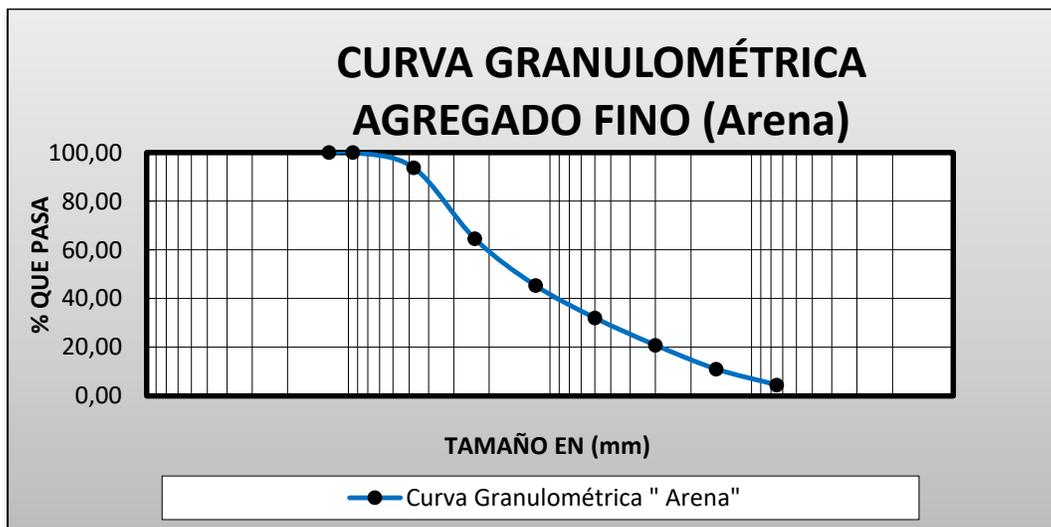
### 3.2.1.1.3. Granulometría del agregado fino

Tabla 3.6: Tabla de resultados de la granulometría del agregado fino (Arena)

Peso Total (gr.) 5000			
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	% que pasa del total
1/2	12.5	0.00	100.00
3/8	9.50	0.00	100.00
N°4	4.75	310.80	93.78
N°8	2.36	1460.40	64.58
N°16	1.18	960.60	45.36
N°30	0.60	663.90	32.09
N°50	0.30	560.50	20.88
N°100	0.15	491.30	11.05
N°200	0.075	325.50	4.54
BASE	-	225.10	0.04
SUMA		4998.1	
PÉRDIDAS		1.9	
MF =		2.89	

De los resultados obtenidos se puede concluir que el material fino tiene un porcentaje mínimo partículas finas, como también el Modulo de Finura se encuentra dentro los parámetros para ser utilizado en mezclas asfálticas.

Figura 3.3: Curva Granulométrica del agregado fino (Arena)



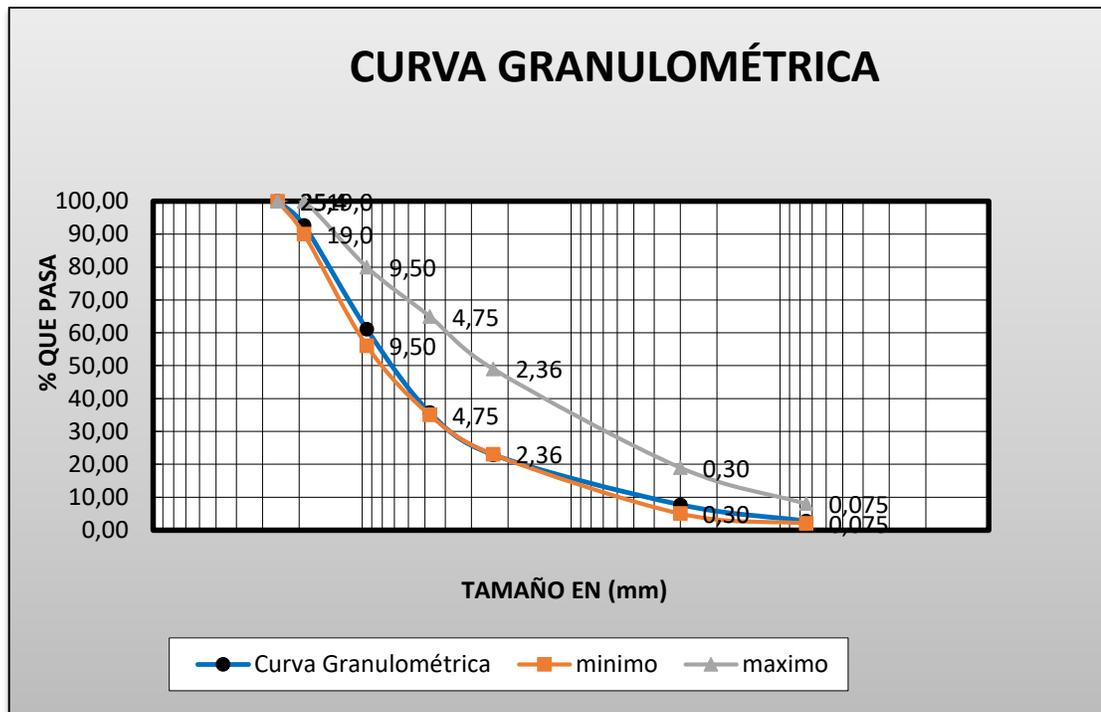
#### 3.3.1.1.4. Granulometría Formada

Tabla 3.7: Tabla de resultados de la granulometría de los agregados

	<b>UNIVERSIDAD AUTONOMA JUAN MISAEL SARACHO</b> FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFIA Y VIAS DE COMUNICACIÓN CARRERA DE INGENIERIA CIVIL(TARIJA-BOLIVIA) <b>GRANULOMETRÍA FORMADA</b>		
	<b>PROYECTO: "EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA ASFALTICA ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET TIPO I)"</b>		
	PROCEDENCIA: SAN MATEO	MUESTRA: N°1	FECHA 19 DE ABRIL 2016  LABORATORISTA: GONZALO ESTEBAN CHOQUE PALACIOS PROYECTO DE GRADO II

Peso Total (gr.)			15000		
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.0	1099.00	1099.00	7.33	92.67
1/2"	12.5	3745.18	4844.18	32.32	67.68
3/8"	9.50	994.98	5839.16	38.95	61.05
N°4	4.75	3798.67	9637.83	64.30	35.70
N°8	2.36	1920.63	11558.46	77.11	22.89
N°16	1.18	1036.77	12595.23	84.02	15.98
N°30	0.60	675.07	13270.30	88.53	11.47
N°50	0.30	566.95	13837.25	92.31	7.69
N°100	0.15	403.97	14241.21	95.01	4.99
N°200	0.075	340.17	14581.38	97.27	2.73
BASE	-	408.50	14989.88	100.00	0.00
SUMA		14989.9			
PÉRDIDAS		10.1			
MF =		6.38			

Figura 3.4: Curva Granulométrica de los agregados



Al observar nuestra curva granulométrica formada por los agregados, la misma que se encuentra dentro de los límites mínimo y máximo establecidos por la AASTHO.

### 3.2.1.2. PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO Y FINO

### 3.2.1.2.1. Peso específico y absorción del agregado fino

Tabla 3.8: Tabla de resultados del peso específico y absorción del agregado fino

	<b>UNIVERSIDAD AUTONOMA JUAN MISAEL SARACHO</b> FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFIA Y VIAS DE COMUNICACIÓN CARRERA DE INGENIERIA CIVIL(TARIJA-BOLIVIA) <b>PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO</b>	
	<b>PROYECTO: "EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA ASFALTICA ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET TIPO I)"</b>	
	AGREGADO: ARENA	MUESTRA: N°1

P. E. A GRANEL (gr/cm <sup>3</sup> )	P. E. SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm <sup>3</sup> )	P. E. APARENTE (gr/cm <sup>3</sup> )	% DE ABSORCIÓN
<b>2.62</b>	<b>2.64</b>	<b>2.66</b>	<b>0.58</b>

De los resultados obtenidos se puede concluir que se tiene un material con una buena resistencia lo que significa que es de buena calidad y apto para diseño de mezclas asfálticas. Además, en función de la absorción podemos afirmar que se trata de un material poroso lo que incide en el porcentaje óptimo de asfalto absorbido.

### 3.2.1.2.2. Peso específico y absorción del agregado grueso (gravilla)

Tabla 3.9: Tabla de resultados del peso específico y absorción del agregado medio (gravilla)

	<b>UNIVERSIDAD AUTONOMA JUAN MISAEL SARACHO</b> FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFIA Y VIAS DE COMUNICACIÓN CARRERA DE INGENIERIA CIVIL(TARIJA-BOLIVIA) <b>PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO MEDIO</b>	
	<b>PROYECTO: "EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA ASFALTICA ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET TIPO I)"</b>	
	AGREGADO: <b>GRAVILLA</b>	MUESTRA: N°1

PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm <sup>3</sup> )	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm <sup>3</sup> )	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm <sup>3</sup> )	% DE ABSORCIÓN
<b>2.46</b>	<b>2.52</b>	<b>2.61</b>	<b>2.32</b>

Al igual que el agregado fino aquí se tiene un material con buena resistencia y elevado índice de absorción lo que nos indica que es una material poroso optimo para la absorción del asfalto.

### 3.2.1.2.3. Peso específico y absorción del agregado grueso

Tabla 310: Tabla de resultados del peso específico y absorción del agregado grueso

	<b>UNIVERSIDAD AUTONOMA JUAN MISAEL SARACHO</b> FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFIA Y VIAS DE COMUNICACIÓN CARRERA DE INGENIERIA CIVIL(TARIJA-BOLIVIA) <b>PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO</b>		
	<b>PROYECTO: "EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA ASFALTICA ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET TIPO I)"</b>		
	AGREGADO: GRAVA	MUESTRA: N°1	FECHA 13 DE ABRIL 2016 LABORATORISTA: GONZALO ESTEBAN CHOQUE PALACIOS PROYECTO DE GRADO II

PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm <sup>3</sup> )	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm <sup>3</sup> )	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm <sup>3</sup> )	% DE ABSORCIÓN
<b>2.46</b>	<b>2.54</b>	<b>2.69</b>	<b>3.54</b>

Se tiene un material con buena resistencia y elevado índice de absorción lo que nos indica que es un material poroso óptimo para la absorción del asfalto.

### 3.2.1.3 EQUIVALENTE DE ARENA

Tabla 3.11: Tabla de resultados de equivalente de arena

	<b>UNIVERSIDAD AUTONOMA JUAN MISAEL SARACHO</b> FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFIA Y VIAS DE COMUNICACIÓN CARRERA DE INGENIERIA CIVIL(TARIJA-BOLIVIA) <b>EQUIVALENTE DE ARENA</b>	
	<b>PROYECTO: "EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA ASFALTICA ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET TIPO I)"</b>	
	AGREGADO: ARENA	MUESTRA: N°1

Equivalente de Arena (%)	NORMA
90.95	> 50%

Los resultados muestran que existe 9.05% de arcilla en el agregado fino ocasionando que el material sea de buena calidad al no ser expansivo.

### 3.2.1.4 RESISTENCIA AL DESGASTE POR ABRASIÓN

### 3.2.1.4.1 Resistencia al desgaste por abrasión de la Grava

Tabla 3.12: Tabla de resultados la resistencia al desgaste por abrasión.

	<b>UNIVERSIDAD AUTONOMA JUAN MISAEL SARACHO</b> FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFIA Y VIAS DE COMUNICACIÓN CARRERA DE INGENIERIA CIVIL(TARIJA-BOLIVIA) <b>RESISTENCIA AL DESGASTE POR ABRASIÓN DE LA GRAVA</b>		
	<b>PROYECTO: "EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA ASFALTICA ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET TIPO I)"</b>		
	AGREGADO: GRAVA	MUESTRA: N°1	<b>FECHA 29 DE ABRIL 2016</b> <b>LABORATORISTA: GONZALO ESTEBAN CHOQUE PALACIOS</b> <b>PROYECTO DE GRADO II</b>

MATERIAL	PESO INICIAL	PESO FINAL	% DE DESGASTE	ESPECIFICACION ASTM
A	3762.90	2722.5	27.65	35% MAX
B	-	-	-	35% MAX
C	-	-	-	35% MAX
D	-	-	-	35% MAX

Partiendo de los resultados se puede afirmar que existe poco desprendimiento de material lo que significa que es un material resistente, lo cual va acorde con la granulometría obtenida para el agregado grueso mostrado anteriormente.

### 3.2.1.4.2. Resistencia al desgaste por abrasión de la Gravilla

Tabla 3.13: Tabla de resultados la resistencia al desgaste por abrasión.

	<b>UNIVERSIDAD AUTONOMA JUAN MISAEL SARACHO</b> FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFIA Y VIAS DE COMUNICACIÓN CARRERA DE INGENIERIA CIVIL(TARIJA-BOLIVIA) <b>RESISTENCIA AL DESGASTE POR ABRASIÓN DE LA GRAVILLA</b>	
	<b>PROYECTO: "EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA ASFALTICA ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET TIPO I)"</b>	
	<b>AGREGADO: GRAVILLA</b>	<b>MUESTRA: N°1</b>

MATERIAL	PESO INICIAL	PESO FINAL	% DE DESGASTE	ESPECIFICACION ASTM
A	-	-	-	35% MAX
B	-	-	-	35% MAX
C	2504.5	1937.5	22.64	35% MAX
D		-	-	35% MAX

Observando los resultados se puede afirmar que existe poco desprendimiento de material gravoso lo que significa que es un material resistente, lo cual va acorde con la granulometría obtenida para el agregado grueso mostrado anteriormente.

## CAPITULO IV

## **DISEÑO, EVALUACION Y ANALISIS DE LA MEZCLA ASFALTICA ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET) DE LA MEZCLA ASFALTICA CONVENCIONAL.**

### **4.1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

Para conocer y analizar posteriormente la incidencia al añadir PET a las mezclas asfálticas convencionales se realizó el siguiente procedimiento, que se describe a continuación:

Existe una infinidad de formas en las que se puede ingresar el PET a una mezcla asfáltica, sin embargo se escogieron tres formas en la presente investigación en función de la facilidad que estas brindan para su producción y de igual forma para su puesta en obra.

Se escogieron porcentajes de PET para los tres casos seleccionados en un rango que varía entre 3% y 20% con respecto al porcentaje óptimo de asfalto; un porcentaje superior al 20% a más de dificultar las labores en el laboratorio al introducirlo en la probeta resultaría poco económico en obra.

Para los tres casos se siguió por completo el procedimiento propuesto por el método Marshall según la norma ASTM D 6927-06 con el fin de comparar los resultados obtenidos con mezclas asfálticas en caliente.

#### **4.1.1. MEZCLA ASFALTICA PARA ENCONTRAR EL CONTENIDO ÓPTIMO DE BETUN**

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado tales como la granulometría y la capacidad de absorción. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo del asfalto. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área

específica total, y mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir, uniformemente, todas las partículas. Por otro lado las mezclas más gruesas (agregados más grandes) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área específica total.

## PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DE ENSAYO

“Las probetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimento son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto (porcentaje de asfalto). El margen de contenidos de asfalto usado en las briquetas de ensayo está determinado con base en experiencia previa con los agregados de la mezcla. Este margen le da al laboratorio un punto de partida para determinar el contenido óptimo de asfalto en la mezcla final.” (American Society for Testing and Materials ASTM, 2010)

Las muestras son preparadas de la siguiente manera:

1. El asfalto y el agregado se calientan y se mezclan completamente hasta que todas las partículas del agregado estén revestidas. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.
2. Las mezclas asfálticas calientes se colocan en los moldes pre-calentados Marshall como preparación para la compactación, en donde se usa el martillo Marshall de compactación, el cual también es calentado para que no enfríe la superficie de la mezcla al golpearla.
3. “Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall. El número de golpes del martillo (35, 50 o 75) depende de la cantidad de tránsito para la cual está siendo diseñada. Ambas caras de cada briketa reciben el mismo número de

golpes. Después de completar la compactación las probetas son enfriadas y extraídas de los moldes.”

4. Una vez compactada la muestra retirarla del equipo de compactación y dejarla enfriar a temperatura ambiente por un máximo de 24h para continuar con el ensayo Marshall.

*Imagen 4.1: Muestra del Agregado para ser mezclado con el Betun.*

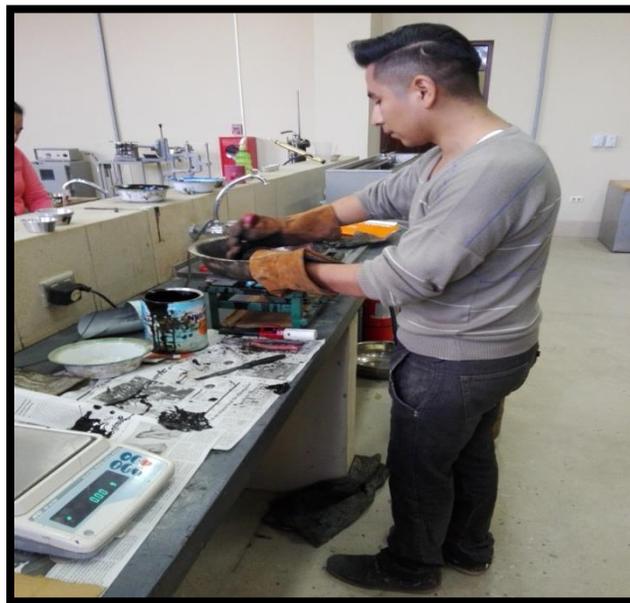


*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 4.2: Muestra del calentado del Betun para luego ser mezclado con el agregado.*



*Imagen 4.3: Mezclado de la de los agregados con el Betun a una temperatura de 140°C*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 4.4: Colocado del material dentro del Cilindro*



*Imagen 4.5: Apizonamiento de la mezcla asfáltica*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 4.6: Compactación con el Martillo Marshall de 75 golpes a ambos lados de la briqueta*

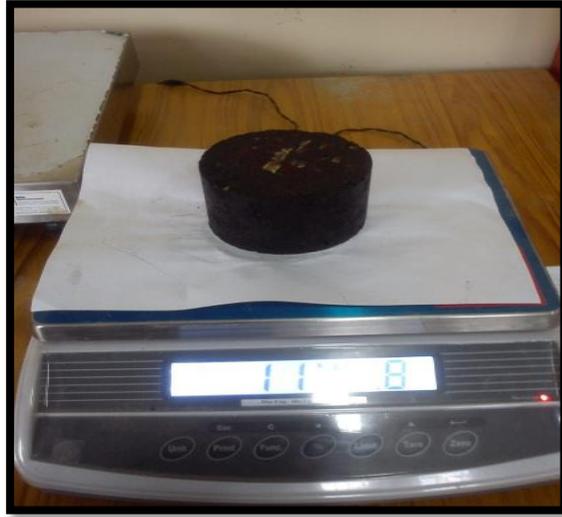


*Imagen 4.7: Muestras Obtenidas del Ensayo Marshall*



#### **4.4.1.1 Determinación de la Densidad**

*Imagen 4.8: Pesaje de cada briqueta en su estado seco al aire libre.*



*Imagen 4.9: Briquetas en Baño María a 25°C por 5 min.*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 4.10: Pesaje de briquetas saturadas con superficie seca.*



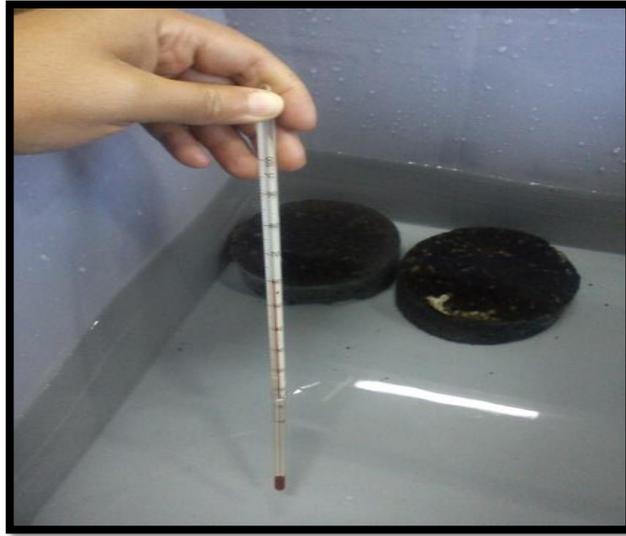
*Imagen 4.11: Determinación del peso sumergido en el agua.*



*Fuente: Elaboración Propia*

#### **4.4.1.2. Determinación de la Estabilidad y Fluencia**

*Imagen 4.12: Briquetas en baño María a 60°C por 35 min para cada briqueta.*



*Imagen 4.13: Colocadode briquetas en la mordaza Marshall*



*Imagen 4.14: Hacer correr y lecturar el dial de Estabilidad (dentro del anillo Marshall) y el dial de deformación para el Flujo.*



*Imagen 4.15: Briqueta ensayada (rota)*



#### **4.2. TRATAMIENTO ESTADISTICO BASICO**

Para el presente trabajo se aplicó la estadística de Student con una confiabilidad del 95% a los datos obtenidos de las lecturas realizadas durante los ensayos por el Método Marshall.

La ecuación a aplicar es la siguiente:

$$R_k = R_m \pm K * S$$

Dónde:

**R<sub>k</sub>**= Resistencia Técnica Característica Marshall

**R<sub>m</sub>**= Resistencia Técnica Característica Marshall

**K** = Coeficiente Student

**S** = Desviación Estandar

*Tabla 4.1: valores del coeficiente de Estudent*

Nº de Ensayos menos 1	K	Nº de Ensayos menos 1	K	Nº de Ensayos menos 1	K
( N-1)		( N-1)		( N-1)	
1	6,31	11	1,8	21	1,72
2	2,92	12	1,78	22	1,72
3	2,35	13	1,77	23	1,71
4	2,13	14	1,76	24	1,71
5	2,02	15	1,75	25	1,71
6	1,94	16	1,75	26	1,71
7	1,9	17	1,74	27	1,7
8	1,86	18	1,73	28	1,7
9	1,85	19	1,73	29	1,7
10	1,81	20	1,72	30	1,7
				Mayor a 30	1,64

TABLA 4.2. DE RESULTADOS DEL ENSAYO MARSHAL CONVENCIONAL

		<b>UNIVERSIDAD AUTONOMA JUAN MISAEL SARACHO</b> <b>FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA</b> <b>DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFIA Y VIAS DE COMUNICACION</b> <b>CARRERA DE INGENIERIA CIVIL (TARIJA-BOLIVIA)</b> <b>DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE METODO MARSHALL</b>										<b>DE MAYO DE 2016</b> <b>LABORATORIA: GONZALO ESTEBAN CHOQUE PALACIOS</b>											
		<b>CONTENIDO OPTIMO DE BETUN</b> <b>AGREGADO SAN MATEO</b>										<b>LABORATORIA: GONZALO ESTEBAN CHOQUE PALACIOS</b>											
<b>pesos especificos</b>		<b>% de agregado</b>		<b>BETUN</b>										<b>AGREGADO</b>		<b>%</b>		<b>NUMERO DE GOLPES 75</b>					
<b>Mat. Retenido Tamiz N</b>		<b>2,60</b>		<b>61,05</b>		<b>CEMENTO ASFALTICO 85-100</b>										<b>Grava</b>		<b>2,59</b>		<b>20</b>			
<b>Mat. Pasa Tamiz N°4</b>		<b>2,66</b>		<b>38,95</b>		<b>PESO ESPECIFICO TOTAL AASHTO T-228</b>										<b>Gravilla</b>		<b>2,61</b>		<b>30</b>			
<b>peso específico total</b>		<b>2,62</b>		<b>100</b>		<b>10080</b>										<b>Arena</b>		<b>2,66</b>		<b>50</b>			
<b>peso específico bulk de mezclas bituminosas Compactadas (AASHTO T-166)</b>										<b>peso específico máximo de Mezclas Compac. (AASHTO T-209)</b>													
<b>N° de probeta</b>	<b>altura de probeta</b>	<b>Peso Briqueta</b>			<b>Volúmen probeta</b>	<b>Densidad Briqueta</b>			<b>% de Vacíos</b>			<b>Estabilidad Marshall</b>					<b>Flujo</b>						
		<b>BETUN</b>	<b>seco</b>	<b>sat. Sup. Seca</b>		<b>sumergida en agua</b>	<b>densidad real</b>	<b>densidad prom.</b>	<b>densidad máxima teorica</b>	<b>% de vacíos mezcla total</b>	<b>V.A.M. (vacíos agregado mineral)</b>	<b>R.B.V. (relación betumen)</b>	<b>lectura del dial</b>	<b>carga</b>	<b>factor de corrección</b>	<b>carga real corr.</b>	<b>carga promedio</b>	<b>lectura dial del flujo</b>	<b>flujo real</b>	<b>flujo promedio</b>			
		<b>%</b>	<b>grs.</b>	<b>grs.</b>	<b>grs.</b>	<b>cc</b>	<b>grs/cm³</b>	<b>grs/cm³</b>	<b>grs/cm³</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>mm</b>	<b>libras</b>	<b>-</b>	<b>libras</b>	<b>libras</b>	<b>pulg.</b>	<b>-</b>	<b>-</b>			
1	6,45	4,5	1168,5	1177,2	620,0	557,2	2,10	2,12	2,448	5,36	17,96	70,15	450	1193,5	0,975	1164	1246	510	0,2008	19,88			
2	6,10		1168,9	1177,1	625,0	552,1	2,12						480	1274,3	1,071	1365		520	0,2047				
3	6,37		1169,2	1175,6	628,0	547,6	2,14						470	1247,4	0,995	1241		500	0,1969				
4	6,14		1167,6	1176,2	627	549,2	2,13						460	1220,5	1,059	1292		490	0,1929				
5	6,57		1170,2	1180,7	626	554,7	2,11						490	1301,3	0,949	1235		510	0,2008				
6	6,30		1171,2	1178,8	625	553,8	2,11						440	1166,6	1,013	1182		500	0,1969				
7	6,2	5,0	1174,8	1181,9	634	547,9	2,14	2,13	2,430	4,85	17,54	72,35	590	1570,5	1,040	1633	1631	480	0,1890	18,57			
8	6,3		1179,3	1187,4	636	551,4	2,14						610	1624,4	1,005	1633		470	0,1850				
9	6,5		1181,4	1188,6	634	554,6	2,13						600	1597,5	0,975	1558		480	0,1890				
10	6,3		1182,3	1190,1	633	557,1	2,12						630	1678,2	1,013	1700		460	0,1811				
11	6,3		1179,6	1192,2	635	557,2	2,12						615	1637,9	1,013	1659		450	0,1772				
12	6,2		1180,2	1189,3	637	552,3	2,14						580	1543,6	1,040	1605		490	0,1929				
13	6,5	5,5	1187,1	1196,4	642	554,4	2,14	2,15	2,412	4,60	17,42	73,59	650	1732,1	0,975	1689	1794	400	0,1575	15,62			
14	6,2		1186,4	1197,5	645	552,5	2,15						680	1812,9	1,035	1876		400	0,1575				
15	6,6		1189,6	1198,3	646	552,3	2,15						660	1759	0,953	1675		390	0,1535				
16	6,1		1190,5	1199,3	648	551,3	2,16						630	1678,2	1,071	1797		410	0,1614				
17	6,3		1187,7	1195,2	647	548,2	2,17						650	1732,1	1,013	1755		380	0,1496				
18	6,1		1192,7	1199,8	645	554,8	2,15						690	1839,8	1,071	1970		400	0,1575				
19	6,5	6,0	1192,3	1202,5	652	550,5	2,17	2,17	2,394	4,01	16,92	76,31	710	1893,7	0,963	1823	1984	350	0,1378	14,01			
20	6,2		1194,6	1204,6	654	550,6	2,17						750	2001,4	1,040	2081		345	0,1358				
21	6,3		1191,4	1199,5	653	546,5	2,18						700	1866,7	1,013	1891		350	0,1378				
22	6,5		1195,5	1207,8	658	549,8	2,17						720	1920,6	0,963	1849		380	0,1496				
23	6,1		1197,2	1208,6	654	554,6	2,16						740	1974,5	1,071	2115		380	0,1496				
24	6,0		1194,3	1205,6	655	550,6	2,17						730	1947,5	1,103	2148		330	0,1299				
25	6,6	6,5	1198,2	1211,3	662	549,3	2,18	2,20	2,377	3,42	16,49	79,26	680	1812,9	0,943	1710	1904	370	0,1457	15,03			
26	6,1		1202,3	1215,6	664	551,6	2,18						670	1786	1,071	1913		380	0,1496				
27	5,9		1203,8	1217,2	665	552,2	2,18						660	1759	1,134	1995		370	0,1457				
28	6,1		1198,7	1209,3	666	543,3	2,21						690	1839,8	1,071	1970		380	0,1496				
29	6,3		1208,7	1215,9	669	546,9	2,21						680	1812,9	1,013	1836		390	0,1535				
30	6,1		1204,9	1205,5	663	542,5	2,22						700	1866,7	1,071	1999		400	0,1575				
<b>especificación</b>		<b>mínimo</b>												<b>1800</b>				<b>8</b>					
		<b>máximo</b>																<b>14</b>					

TABLA 4.3. DE RESULTADOS DEL ENSAYO MARSHALL PARA EL CONTENIDO OPTIMO DE BETUN

PORCENTAJE DE PET TIPO FIBRA	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm <sup>3</sup> )	ESTABILIDAD (libras)	FLUJO	% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)	R.B.V. (RELACIÓN BETÓN VACIOS) (%)	V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)
4.5	2.12	1246	1988	5.36	70.15	17.96
5.0	2.13	1631	1857	4.85	72.35	17.54
5.5	2.15	1794	15.62	4.60	73.59	17.42
6.0	2.17	1984	14.01	4.01	76.31	16.92
6.5	2.20	1904	15.03	3.42	79.26	16.49

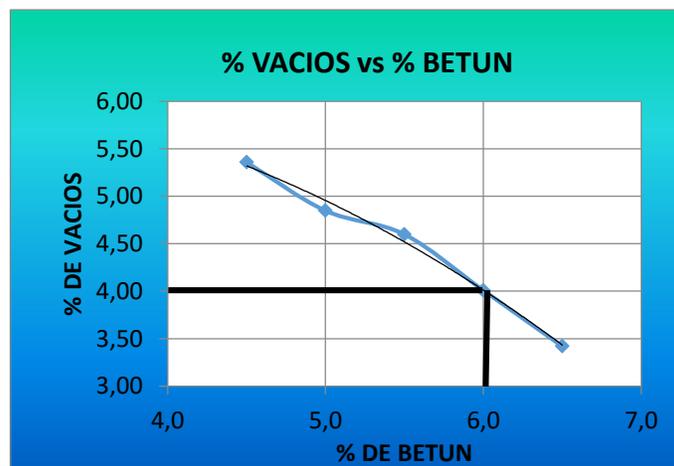
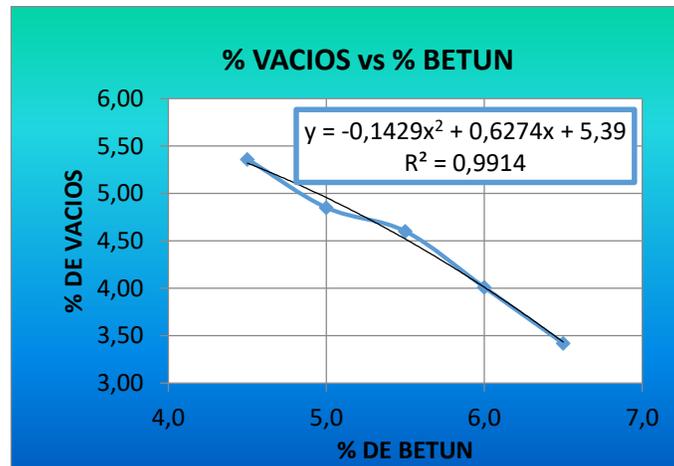
En los gráficos siguientes se evaluó el porcentaje correspondiente a 6.0%; mismo que fue determinado en función del cumplimiento de la norma como porcentaje óptimo como se describe a continuación.

Para realizar los ensayos el valor porcentaje óptimo de Betun del 6%

- **Gráfico Porcentaje de Betun vs Porcentaje de Vacíos:**

Según norma ASTM, se estipula un porcentaje de vacíos entre 3 y 5% para vías de alto tráfico por lo que se selecciona un valor intermedio de 4% dando como porcentaje de asfalto óptimo 6.0%.

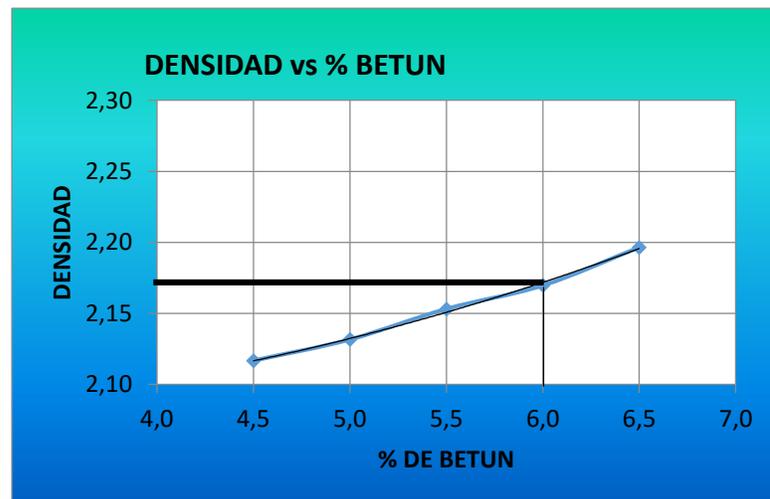
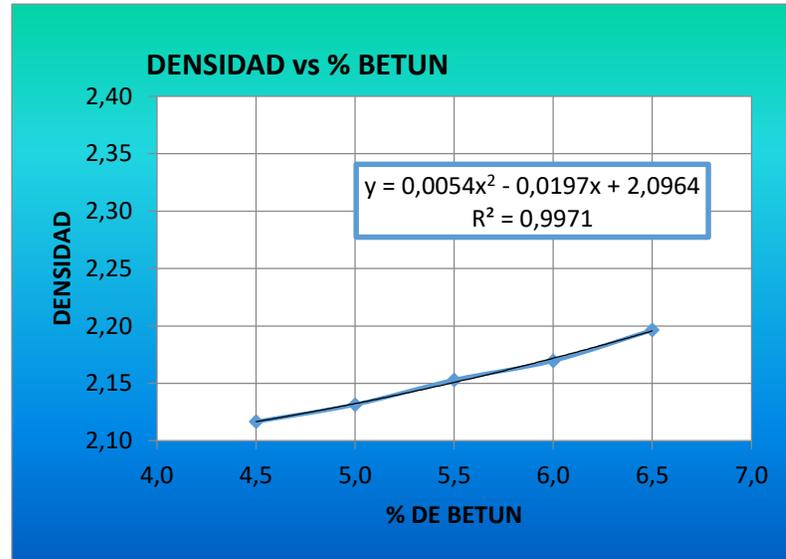
Figura: 4.4 % de Vacios Vs % Betun



En el gráfico se observa que el porcentaje de vacíos es inversamente proporcional al porcentaje de Betun, es decir que a mayor porcentaje de betún, existirá menos vacíos en la carpeta asfáltica

- **Gráfico Porcentaje de Betun vs Densidad:**

Figura: 4.2 % de Densidad Vs % Betun

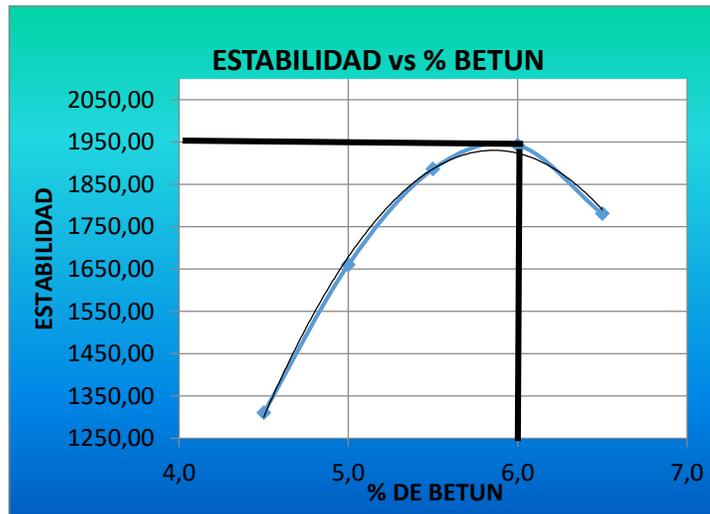
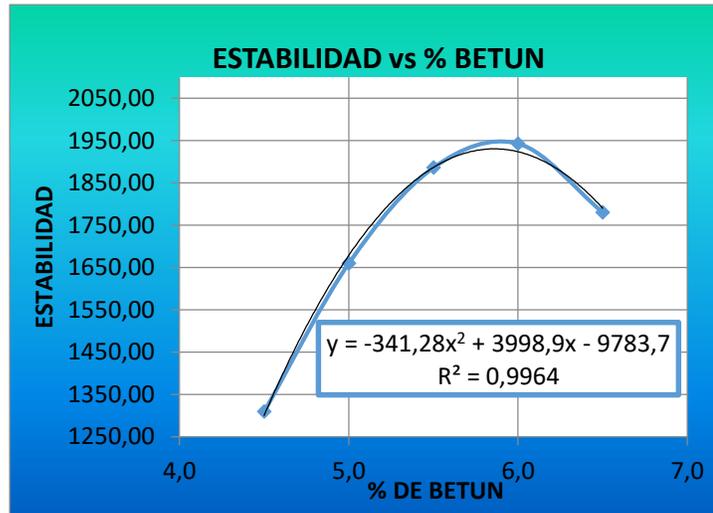


En el gráfico se observa que la densidad es directamente proporcional al porcentaje de Betun, es decir que a mayor porcentaje de Betun, mayor será la densidad.

**Gráfico Porcentaje de Betun vs Estabilidad:**

Según la norma, se estipula una estabilidad mínima de 8006N o 1800 lb. para vías de alto tráfico; en el caso actual se tiene una estabilidad de 1943 lb para el porcentaje de asfalto óptimo de 6.0% por lo que se cumple a cabalidad la normativa.

Figura: 4.3. Estabilidad Vs % Betun

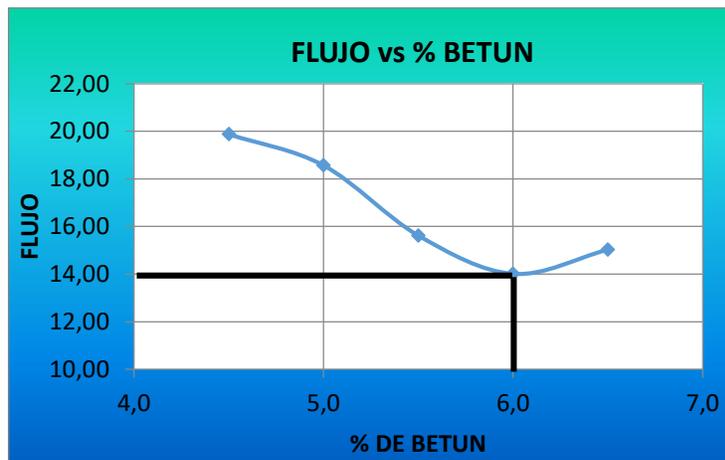
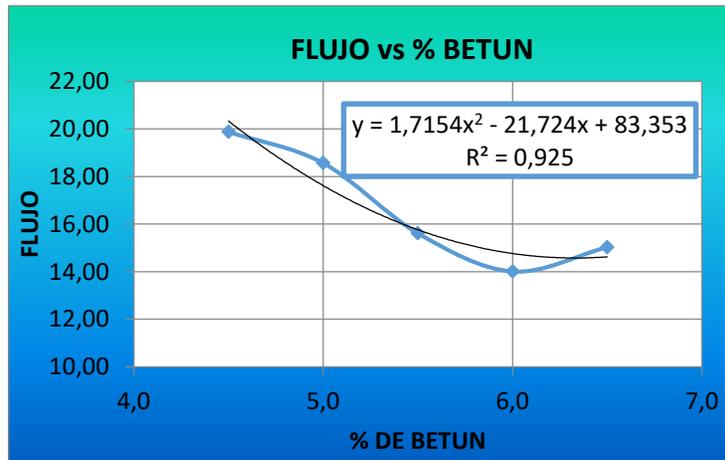


En el gráfico se observa que la estabilidad crece a medida que el porcentaje de Betun aumenta, pero llega un punto que al añadir Betun más de un 6% la estabilidad decrece

- **Gráfico Porcentaje de Asfalto vs Flujo:**

Según la norma, se estipula un flujo a 0.25mm entre 8 y 14 para vías de alto tráfico; en el caso actual se tiene un flujo de 14 para el porcentaje de asfalto óptimo de 6.0% por lo que se cumple a cabalidad la normativa.

Figura: 4.4 Flujo Vs % Betun

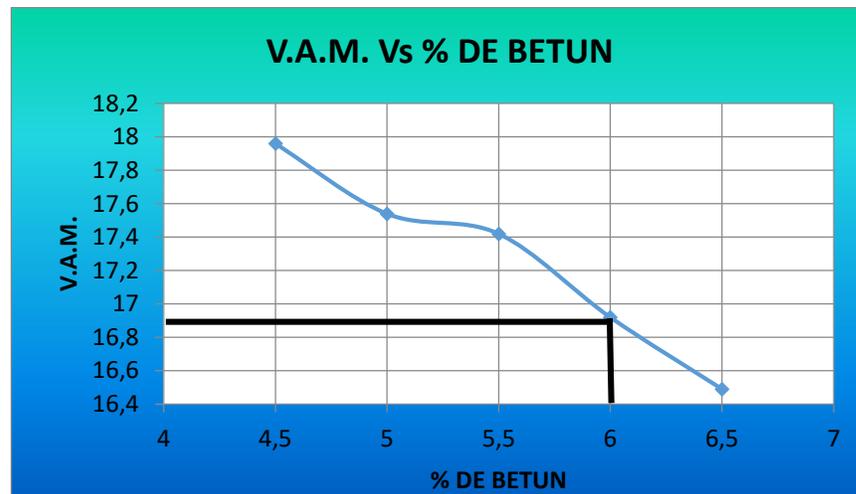
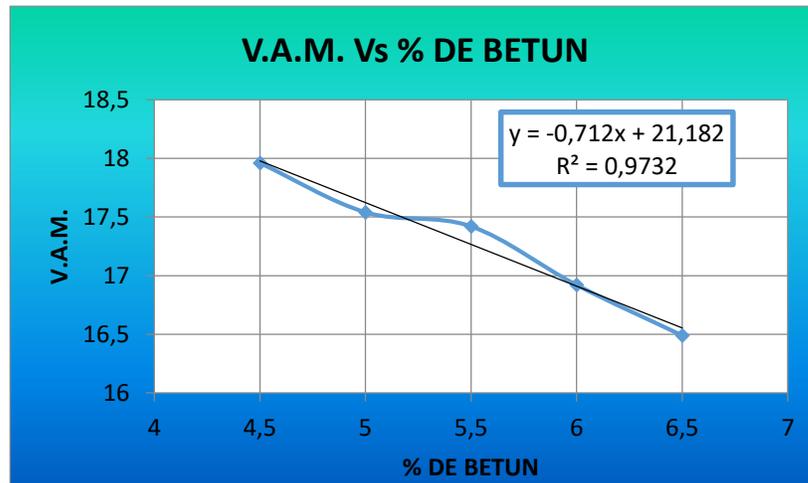


En el gráfico se observa que el Flujo va disminuyendo a medida que el porcentaje de Betun aumenta, pasado el 6% de Betun empieza a subir nuevamente el Flujo

- **Gráfico Porcentaje de Betun vs Porcentaje de Vacíos de Agregado Mineral:**

Según la norma, para criterios Marshall, en función de los vacíos de aire de diseño ( $V_a$ ) se estipula que el valor mínimo de porcentaje de vacíos de agregado mineral (VMA) es de 13% para un  $V_a$  de 4% y un tamaño máximo nominal de 19mm; por lo que el valor obtenido de 16.92% para el porcentaje de asfalto óptimo igual a 6.0% cumple

Figura: 4.5. V.A.M. Vs % Betun

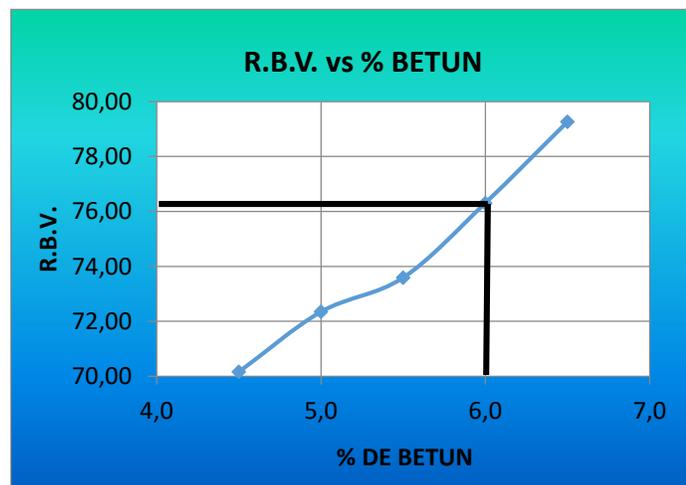
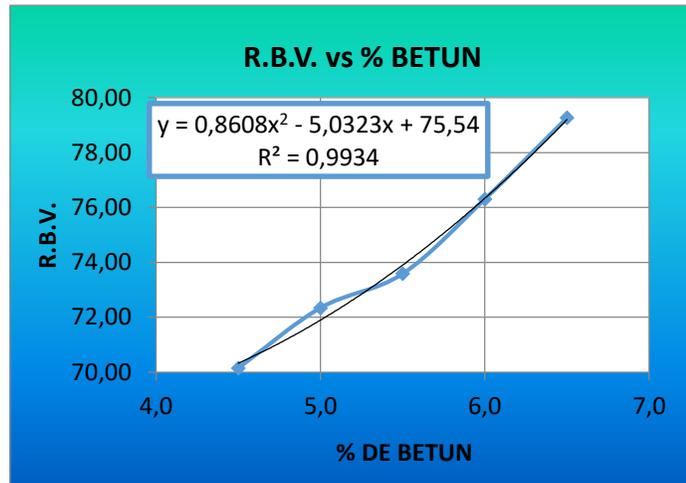


Como se observa en la grafica el porcentaje de vacios del agregado mineral tiende a disminuir si el porcentaje de Betun aumenta.

- **Gráfico Porcentaje de Asfalto vs Porcentaje de Vacíos Llenos de Asfalto:**

Según la normativa, se estipula un porcentaje de vacíos llenos de Betun entre 75 y 82% para vías de alto tráfico; en el caso actual se tiene un valor de 76.31% para el porcentaje de asfalto óptimo de 6.0% por lo que se cumple con la normativa.

Figura: 4.6 R.B.V. Vs % Betun



En el gráfico se observa que la Relación Betun-Vacíos es directamente proporcional al porcentaje de Betun, es decir a mayor porcentaje de Betun mayor será la Relación Betun-Vacíos del Agregado Mineral

#### 4.1.2. MEZCLA ASFALTICA ADICIONANDO ADICIONANDO PET TIPO FIBRA

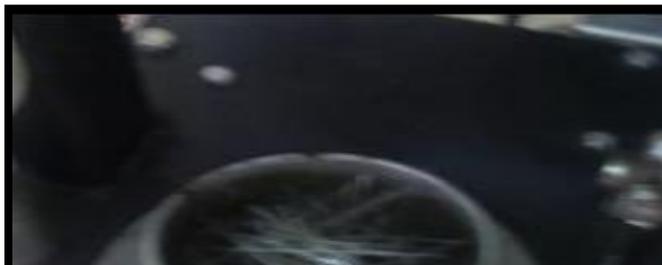
Para los 5 casos que evaluaremos se considero a la mezcla asfáltica con un porcentaje óptimo de 6%.

Para el efecto se recortó fibras con una dimensión no menor a 3mm de ancho y una longitud aproximada entre 5 y 8cm, provenientes de botellas plásticas PET tipo 1 usadas en bebidas carbonatadas mayormente. La disposición de las fibras plásticas se la realizó al momento de colocar la muestra mezclada dentro del molde de compactación Marshall en tres capas garantizando la completa disposición del mismo en toda la dimensión de la probeta, de tal forma que las fibras queden paralelas a la dimensión más grande de la probeta (altura) y perpendiculares a la aplicación de la carga al momento del Marshall obligándolas a trabajar a flexión y tracción.

*Imagen 4.16:PET TipoFibra*



*Imagen 4.17:PET Tipo Fibra colocado en molde en tres capas*



*Imagen 4.18: Compactacion de la mezcla asfáltica con PET tipo fibra*

La compactación con el martillo Marshall se lo realizar con 75 golpes por cada lado de la briqueta



*Imagen 4.19: Rotura de Briqueta PET Tipo Fibra*



*Fuente: Elaboración Propia*

TABLA 4.4. DE RESULTADOS DEL ENSAYO MARSHAL DE MEZCLA ASFALTICA ANADIENDO PET TIPO FIBRA

		<b>UNIVERSIDAD AUTONOMA JUAN MISAEL SARACHO</b> <b>FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA</b> <b>DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFIA Y VIAS DE COMUNICACION</b> <b>CARRERA DE INGENIERIA CIVIL (TARIJA-BOLIVIA)</b> <b>DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE METODO MARSHALL</b>											<b>PROYECTO: EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA ASFALTICA ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET TIPO I)</b>						
		<b>MUESTRA DE LA MEZCLA ASFALTICA CON PET TIPO FIBRA</b> <b>AGREGADO SAN MATEO</b>						<b>FECHA 20 DE MAYO DE 2016</b> <b>LABORATORISTA: GONZALO ESTEBAN CHOQUE PALACIOS</b>											
<b>pesos especificos</b>		<b>% de agregado</b>		<b>BETÓN</b>						<b>AGREGADO</b>		<b>%</b>		<b>NUMERO DE GOLPES 75</b>					
Mat. Retenido Tamiz	2,60	61,05		<b>CEMENTO ASFALTICO 85-100</b>						Grava	2,59	20							
Mat. Pasa Tamiz N°4	2,66	38,95		<b>PESO ESPECIFICO TOTAL AASHTO T-228</b>						Gravilla	2,61	30							
peso especifico total	2,62	100		10080						Arena	2,66	50							
<b>peso especifico bulk de mezclas bituminosas Compactadas (AASHTO T-166)</b>				<b>peso especifico maximo de Mezclas Compac. (AASHTO T-209)</b>				<b>Estabilidad Marshall</b>				<b>Flujo</b>							
N° de probeta	altura de probeta	Peso Briqueta				Densidad Briqueta		% de Vacios			Estabilidad Marshall				Flujo				
		seco		sumergida en agua		densidad real	densidad promedio	densidad maxima	% de vacios	V.A.M. (vacios agregado mineral)	R.B.Y. (relacion betumen)	lectura dial	carga	factor de correccion	carga real corregida	carga promedio	lectura dial del flujo	flujo real	flujo promedio
	PET	grs.	grs.	grs.	cc	grs/cm <sup>3</sup>	grs/cm <sup>3</sup>	grs/cm <sup>3</sup>	%	%	%	libras		libras	libras	Pulg	-	-	
1	6,20	1160,2	1163,5	610,0	553,5	2,15						450	1194	1,040	1241		3,60	0,1417	
2	6,10	1163,4	1167,2	612,0	555,2	2,12						480	1274	1,071	1365		3,90	0,1535	
3	6,10	1164,4	1167,3	614,0	553,3	2,14	2,13	2,394	4,55	17,22	73,58	470	1247	1,071	1336	13,10	3,80	0,1496	14,99
4	6,20	1162,1	1165,2	615	550,2	2,11						460	1220	1,040	1269		3,75	0,1476	
5	6,00	1165,3	1169,1	619	550,1	2,12						490	1301	1,103	1435		4,10	0,1614	
6	6,20	1166,5	1169,2	614	555,2	2,13						440	1167	1,040	1213		3,70	0,1457	
7	6,4	1169,5	1173,2	645	528,2	2,21						620	1651	0,988	1631		4,70	0,1850	
8	6,2	1173,5	1176,3	636	540,3	2,17						610	1624	1,040	1689		4,80	0,1890	
9	6,2	1175,6	1178,2	635	543,2	2,16	2,16	2,394	4,12	16,99	75,75	640	1705	1,040	1773	17,11	4,90	0,1929	19,03
10	6,3	1177,3	1181,2	629	552,2	2,13						630	1678	1,013	1700		4,70	0,1850	
11	6,1	1173,6	1176,9	630	546,9	2,15						615	1638	1,071	1754		5,00	0,1969	
12	6,2	1174,4	1177,5	629	548,5	2,14						620	1651	1,040	1717		4,90	0,1929	
13	6,2	1179,5	1183,4	650	533,4	2,21						790	2109	1,040	2193		5,20	0,2047	
14	6,2	1178,6	1182,3	642	540,3	2,18						770	2055	1,040	2137		5,00	0,1969	
15	6,1	1182,3	1185,2	640	545,2	2,17	2,17	2,394	4,02	16,94	76,27	780	2082	1,071	2230	22,18	5,50	0,2165	21
16	6,3	1185,3	1188,6	639	549,6	2,16						760	2028	1,013	2055		5,50	0,2165	
17	5,8	1182,6	1185,7	638	547,7	2,16						790	2109	1,165	2457		5,60	0,2205	
18	6,0	1185,2	1188,6	637	551,6	2,15						760	2028	1,103	2237		5,20	0,2047	
19	6,4	1186,3	1189,3	648	541,3	2,19						860	2298	0,988	2270		6,00	0,2362	
20	6,3	1188,5	1191,1	649	542,1	2,19						880	2351	1,013	2382		5,90	0,2323	
21	6,2	1186,2	1189,4	647	542,4	2,19	2,19	2,394	3,91	16,93	76,90	890	2378	1,040	2474	23,55	6,10	0,2402	23,49
22	6,4	1189,5	1193,3	645	548,3	2,17						860	2298	0,988	2270		5,80	0,2283	
23	6,4	1187,3	1190,2	649	541,2	2,19						890	2378	0,988	2350		5,90	0,2323	
24	6,3	1184,5	1188,3	648	540,3	2,19						880	2351	1,013	2382		6,10	0,2402	
25	6,9	1192,3	1196,3	655	541,3	2,20						790	2109	0,877	1850		6,40	0,2520	
26	6,0	1195,5	1198,7	652	546,7	2,19						800	2136	1,103	2356		6,60	0,2598	
27	6,8	1196,3	1200,2	655	545,2	2,19	2,20	2,394	3,75	16,82	77,71	810	2163	0,898	1942	2,143	6,80	0,2677	26,05
28	6,3	1197,2	1201,3	655	546,3	2,19						820	2190	1,013	2218		6,50	0,2559	
29	6,2	1199,2	1204,6	658	546,6	2,19						830	2217	1,040	2305		6,60	0,2598	
30	6,5	1195,5	1199,5	657	542,5	2,20						850	2271	0,963	2187		6,80	0,2677	
especificacion		minimo		3		13		75				1800				8			
		maximo		5		82										14			

TABLA 4.5. DE RESULTADOS DEL ENSAYO MARSHALL PARA EL CONTENIDO OPTIMO DE PET TIPO FIBRA PARA LA MEZCLA ASFALTICA

<b>PORCENTAJE DE PET TIPO FIBRA</b>	<b>DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>ESTABILIDAD AD (libras)</b>	<b>FLUJO</b>	<b>% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)</b>	<b>R.B.V. (RELACION BETUN VACIOS) (%)</b>	<b>V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)</b>
<b>3,0</b>	2,13	1309,98	14,99	4,55	73,58	17,22
<b>5,0</b>	2,16	1710,83	19,03	4,12	75,75	16,99
<b>10,0</b>	2,17	2218,31	21,00	4,02	76,27	16,94
<b>15,0</b>	2,19	2355	23,49	3,91	76,91	16,93
<b>20,0</b>	2,20	2142,68	26,05	3,75	77,70	16,82

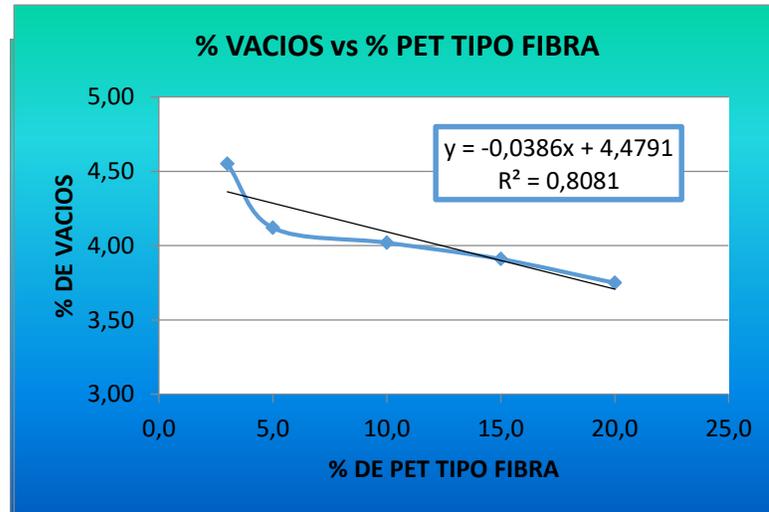
Para el análisis de la cantidad de PET Tipo 1 óptimo dispuesto en forma de fibra se siguieron los conceptos anteriormente utilizados como se muestra a continuación:

Para un porcentaje óptimo de Betun del 6% el porcentaje óptimo de PET Tipo Fibra es de 15%

- **Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Porcentaje de Vacíos:**

Según la norma, se estipula un porcentaje de vacíos entre 3 y 5% para vías de alto tráfico por lo que se selecciona un valor intermedio de 3.91% dando como porcentaje de PET Tipo 1 óptimo de 15%.

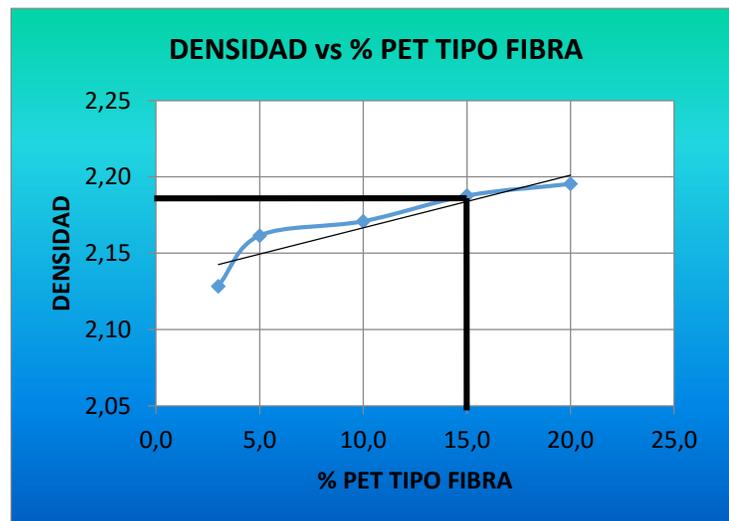
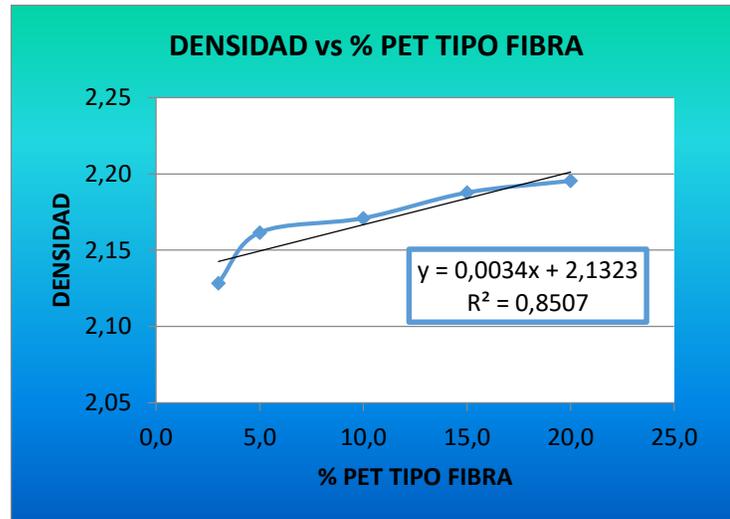
Figura: 4.8 % DE VACIOS Vs % PET TIPO FIBRA



En el gráfico se observa que el porcentaje de vacíos es inversamente proporcional al porcentaje de PET Tipo Fibra, es decir que a mayor porcentaje de PET Tipo Fibra, existirá menos vacíos en la carpeta asfáltica

- **Gráfico Porcentaje de PET Tipo Fibra Vs Densidad:**

Figura: 4.9 % de DENSIDAD Vs % PET TIPO FIBRA

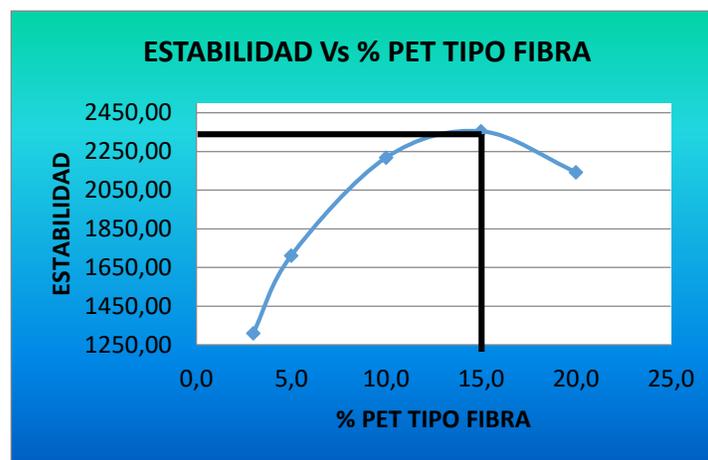
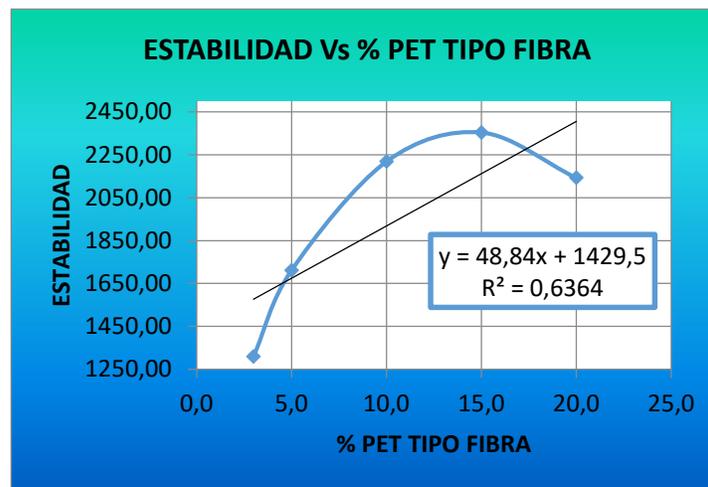


En el gráfico se observa que la densidad es directamente proporcional al porcentaje de PET Tipo Fibra, es decir que a mayor porcentaje de PET Tipo Fibra, mayor será la densidad

- **Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Estabilidad:**

Según la norma, se estipula una estabilidad mínima de 8006N (816.37kg o 1796lb) para vías de alto tráfico; en el caso actual se tiene una estabilidad de 2355lb para el porcentaje de PET Tipo 1 óptimo de 15% por lo que se cumple a cabalidad la normativa.

Figura: 4.10 % de ESTABILIDAD Vs % PET TIPO FIBRA

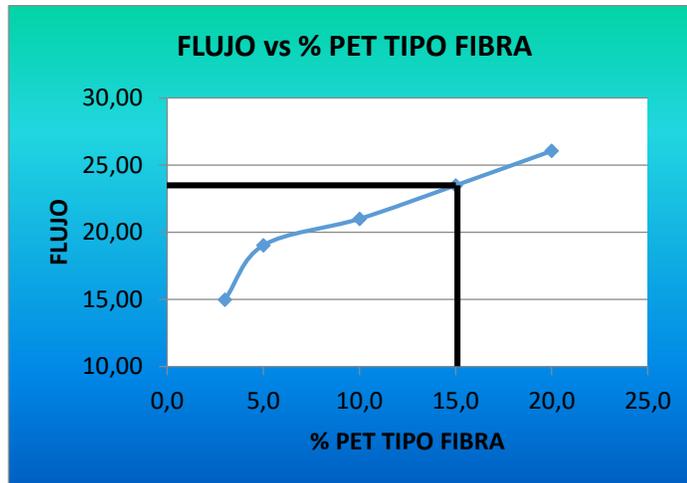
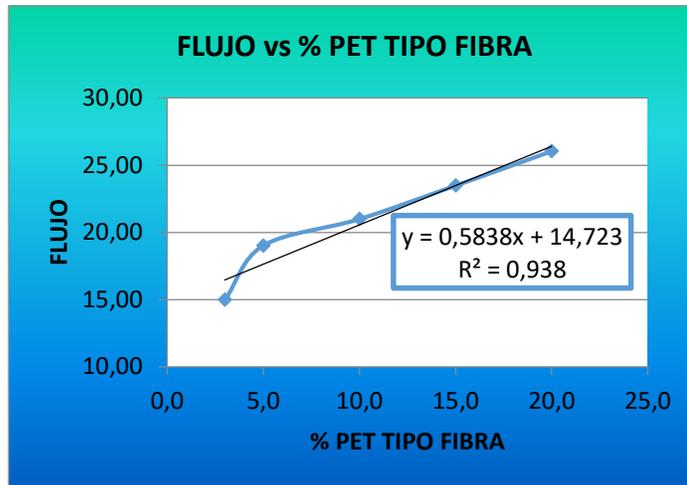


En el gráfico se observa que la estabilidad crece a medida que el porcentaje de PET Tipo Fibra aumenta, sin embargo en el gráfico se observa que llega un punto que decae la estabilidad, lo que significa que no se debe exceder el % óptimo de PET Tipo Fibra

- **Gráfico Porcentaje de PET Tipo Fibra vs Flujo:**

Según la norma, se estipula un flujo entre 8 y 14 para vías de alto tráfico; en el caso actual se tiene un flujo de 23 para el porcentaje de PET Tipo 1 óptimo de 15% por lo que no se cumple a cabalidad la normativa.

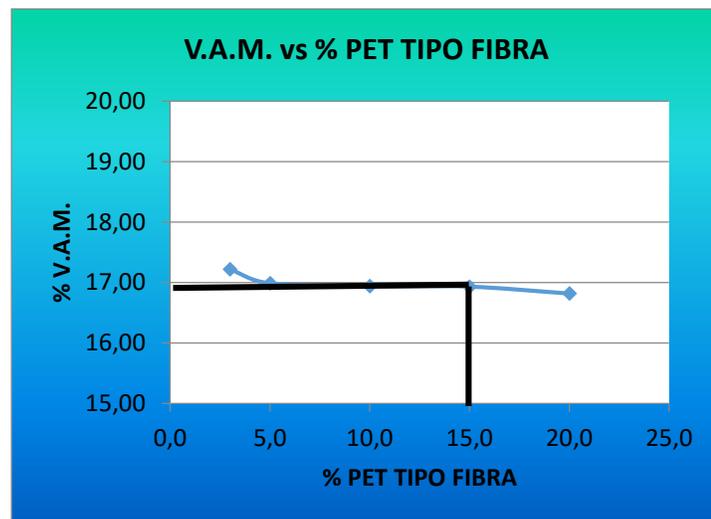
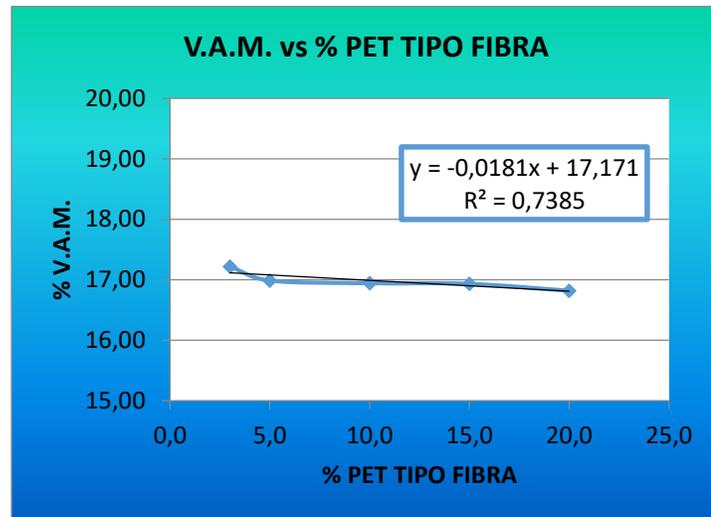
Figura: 4.11 % de FLUJO Vs % PET TIPO FIBRA



En el gráfico se observa que el flujo es proporcional al porcentaje de PET Tipo Fibra, es decir que a mayor porcentaje de PET Tipo Fibra, mayor será el flujo

- Gráfico Porcentaje de PET Tipo Fibra vs % de Vacíos de Agregado Mineral:**  
 Según la norma para criterios Marshall, en función de los vacíos de aire de diseño ( $V_a$ ) se estipula que el valor mínimo de porcentaje de vacíos de agregado mineral (VMA) es de 13% para un  $V_a$  de 4% y un tamaño máximo nominal de 19mm; por lo que el valor obtenido de 16.93% para el porcentaje de PET Tipo 1 igual a 15% cumple.

Figura: 4.12 % DE VAM Vs % PET TIPO FIBRA

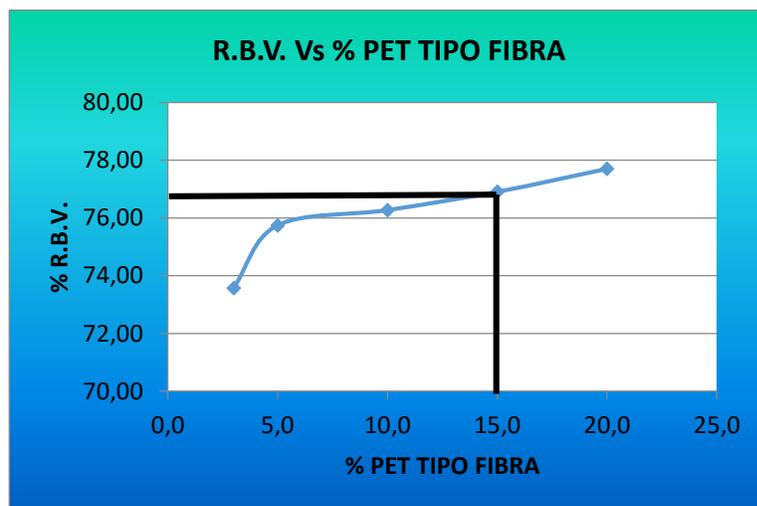
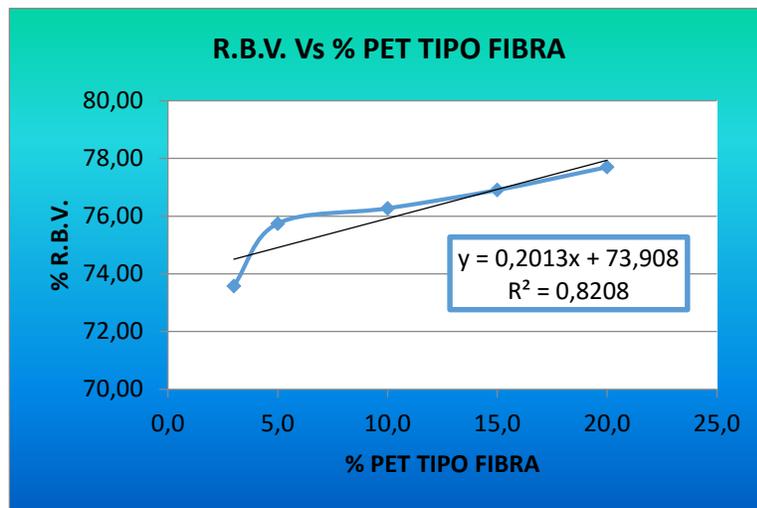


En el gráfico se observa que a medida que se incrementa Pet Tipo fibra a la mezcla menor es el porcentaje contenido de vacío mineral.

- **Gráfico Porcentaje de Asfalto vs Porcentaje de Vacíos Llenos de Asfalto:**

Según la norma se estipula un porcentaje de vacíos llenos de asfalto entre 75 y 82% para vías de alto tráfico; en el caso actual se tiene un valor de 76.91% para el porcentaje de PET Tipo 1 óptimo de 15% por lo que se cumple con la normativa.

Figura: 4.13 % DE RBV Vs % PET TIPO FIBRA



En el gráfico se observa que la Relación Betun-Vacios es directamente proporcional al porcentaje de PET Tipo Fibra, es decir a mayor porcentaje de PET Tipo Fibra mayor será la Relación Betun-Vacios del Agregado Mineral

#### **4.1.3. EVALUACION DE UNA MEZCLA ASFALTICA ADICIONANDO PET TRITURADO PASANTE DEL TAMIZ # 3/8 Y RETENIDO EN EL TAMIZ #4**

Para fines de comprobar las variaciones que provocan en la mezcla en caliente los diferentes tamaños de PET tipo 1 triturado se tamizó dicho material y se seleccionó como tamaño representativo para partícula gruesa al retenido en el tamiz #4 o pasante del tamiz #3/8. En este caso se adicionó el material durante el proceso de preparación de la mezcla a una temperatura aproximada de 140°C con el objetivo de obtener una dispersión adecuada de todo el PET más agregado y asfalto en toda la probeta.

Concluida la elaboración de la mezcla se colocó el conjunto de materiales en el molde de compactación Marshall siguiendo los procesos según la norma ASTM 6927-06 de forma regular hasta la finalización del proceso.

*Imagen 4.20: Tamizado del PET Triturado*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 4.21: Pesado del material tamizado para luego añadir a la mezcla asfáltica convencional*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 4.22: Mezclado del PET Triturado con la mezcla asfáltica convencional a una temperatura de 140° C*



*Imagen 4.23: Colocado de la briqueta para el Ensayo Marshall que medirá la Estabilidad y la Fluencia*



*Imagen 4.24: Rompimiento de la Briqueta*



*Imagen 4.25: Briqueta luego ensayada*



*Fuente: Elaboración Propia*

TABLA 4.6. DE RESULTADOS DEL ENSAYO MARSHAL DE MEZCLA ASFALTICA ANADIENDO PET TRITURADO PASANTE DEL TAMIZ # 3/8 Y RETENIDO EN EL TAMIZ #4

		<b>UNIVERSIDAD AUTONOMA JUAN MISAEL SARACHO</b> <b>FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA</b> <b>DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFIA Y VIAS DE COMUNICACION</b> <b>CARRERA DE INGENIERIA CIVIL (TARJA-BOLIVIA)</b> <b>DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE METODO MARSHALL</b>																		
<b>PROYECTO: EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA ASFALTICA ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET TIPO D)</b>											<b>FECHA MAYO DE 2016</b>									
<b>MEZCLA ASFALTICA ADICIONANDO PET TRITURADO PASANTE DEL TAMIZ # 3/8 Y RETENIDO EN EL TAMIZ #4</b>											<b>LABORATORISTA: GONZALO ESTEBAN CHOQUE PALACIOS</b>									
<b>pesos específicos</b>		<b>% de agregado</b>		<b>BETÓN</b>			<b>AGREGADO</b>		<b>%</b>		<b>NUMERO DE GOLPES 75</b>									
Mat. Retenido Tamiz	2,60	61,05	CEMENTO ASFALTICO 85-100			Grava	2,59	20												
Mat. Pasa Tamiz N°4	2,66	38,95	PESO ESPECIFICO TOTAL AASHTO T-228			Gravilla	2,61	30												
peso específico total	2,62	100	10080			Arena	2,66	50												
<b>peso específico bulk de meclas bituminosas Compactadas (AASHTO T-166)</b>						<b>peso específico maximo de Mezclas Compac. (AASHTO T-209)</b>														
N° de probeta	altura de probeta	PET	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacios			Estabilidad Marshall				Flujo			
			seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		densidad real	densidad promedio	densidad maxima teorica	% de vacios mezcla tota	V.A.M.(vacios agregado mineral)	R.B.V. (relacion betumen)	lectura del dial	carga	factor de correccion	carga real corregida	carga promedio	lectura del flujo	flujo real	flujo promedio
			grs.	grs.	grs.		cc	grs/cm <sup>3</sup>	grs/cm <sup>3</sup>	grs/cm <sup>3</sup>	%	%	%	libras		libras	libras	Pulg	-	-
1	6,30	3	1172,5	1177,5	621,0	556,5	2,18	2,18	2,394	3,05	16,01	80,95	700	1867	1013	2137	1866	600	0,2362	24,1
2	6,50		1175,3	1180,2	623,0	557,2	2,16						720	1920,6	0,963	1952	605	0,2382		
3	6,40		1174,3	1178,3	622,0	556,3	2,16						715	1907,1	0,988	1883	610	0,2402		
4	6,60		1175,6	1181,3	624	557,3	2,18						710	1893,7	0,943	1786	620	0,2441		
5	6,40		1174,3	1179,9	626	553,9	2,19						730	1947,5	0,988	1923	640	0,2520		
6	6,30		1172,3	1178,4	624	554,4	2,19						690	1839,8	1,013	1864	604	0,2378		
7	6,2	5	1175,6	1182,1	625	557,1	2,15	2,15	2,394	3,30	16,09	79,49	690	1839,8	1,040	1913	1947	580	0,2283	21,8
8	6,4		1176,8	1185,5	627	558,5	2,16						710	1893,7	0,988	1870	550	0,2165		
9	6,3		1179,3	1185,5	622	563,5	2,14						730	1947,5	1,013	1973	530	0,2087		
10	6,2		1177,5	1183,9	623	560,9	2,15						715	1907,1	1,040	1983	560	0,2205		
11	6,1		1179,4	1185,6	627	558,6	2,15						710	1893,7	1,071	2028	540	0,2126		
12	6,2		1177,8	1187,6	619	568,6	2,14						690	1839,8	1,040	1913	560	0,2205		
13	6,2	10	1185,9	1192,2	639	553,2	2,14	2,14	2,394	3,80	16,58	77,08	760	2028,3	1,040	2109	2080	480	0,1890	18,6
14	6,2		1187,5	1192,6	643	549,6	2,16						750	2001,4	1,040	2081	470	0,1850		
15	6,3		1188,6	1194,2	640	554,2	2,12						730	1947,5	1,013	1973	460	0,1811		
16	6,3		1187,2	1193,7	638	555,7	2,14						770	2055,2	1,013	2082	455	0,1791		
17	6,0		1188,4	1194,2	638	556,2	2,14						760	2028,3	1,103	2237	480	0,1890		
18	6,2		1186,8	1191,1	641	550,1	2,16						720	1920,6	1,040	1997	490	0,1929		
19	6,3	15	1195,6	1201,3	645	556,3	2,11	2,10	2,394	4,01	16,50	75,70	680	1812,9	1,013	1836	1831	420	0,1654	17,0
20	6,4		1197,6	1203,4	648	555,4	2,11						690	1839,8	0,988	1817	415	0,1634		
21	6,2		1198,3	1207,5	647	560,5	2,09						670	1786	1,040	1857	450	0,1772		
22	6,3		1199,7	1205,5	648	557,5	2,10						660	1759	1,013	1782	460	0,1811		
23	6,1		1196,5	1201,3	645	556,3	2,11						650	1732,1	1,071	1855	430	0,1693		
24	6,3		1199,3	1208,6	649	559,6	2,07						680	1812,9	1,013	1836	420	0,1654		
25	6,5	20	1203,2	1207,3	655	552,3	2,11	2,09	2,394	4,30	16,76	74,34	580	1543,6	0,963	1486	1514	380	0,1496	15,5
26	6,2		1210,1	1213,3	652	561,3	2,11						550	1462,8	1,040	1521	390	0,1535		
27	6,3		1205,7	1208,9	651	557,9	2,10						540	1435,9	1,013	1455	380	0,1496		
28	6,4		1206,9	1210,4	658	552,4	2,09						590	1570,5	0,988	1551	400	0,1575		
29	6,2		1201,4	1205,5	657	548,5	2,07						600	1597,5	1,040	1661	410	0,1614		
30	6,2		1203,3	1207,5	658	549,5	2,08						510	1355,1	1,040	1409	405	0,1594		
especificacion			mínimo			3			B			75			1800			8		
			maximo			5						82						14		

TABLA 4.7. DE RESULTADOS DEL ENSAYO MARSHALL PARA EL CONTENIDO OPTIMO DE PET TRITURADO PASANTE DEL TAMIZ # 3/8 Y RETENIDO EN EL TAMIZ #4

<b>PORCENTAJE DE PET</b>	<b>DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>ESTABILIDAD (libras)</b>	<b>FLUJO</b>	<b>% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)</b>	<b>R.B.V. (RELACIÓN BETÚN VACIOS) (%)</b>	<b>V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)</b>
<b>3,0</b>	2,18	1865,98	24,15	3,05	80,95	16,01
<b>5,0</b>	2,15	1946,86	21,78	3,30	79,49	16,09
<b>10,0</b>	2,14	2080,05	18,60	3,80	77,05	16,56
<b>15,0</b>	2,10	1830,68	17,03	4,01	75,70	16,50
<b>20,0</b>	2,09	1513,86	15,52	4,30	74,34	16,76

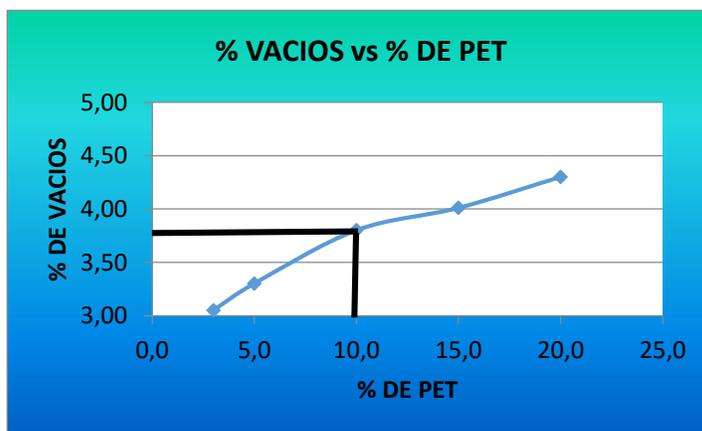
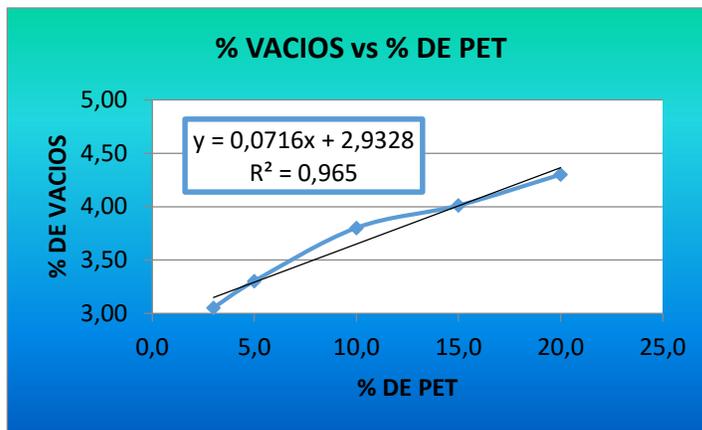
Para el análisis de la cantidad de PET Tipo 1 óptimo triturado y retenido en el tamiz #4 se siguieron los conceptos anteriormente utilizados como se muestra a continuación:

Para un porcentaje optimo de Betun del 6% el porcentaje optimo de PET triturado pasante del tamiz # 3/8 y retenido en el tamiz #4 es de 10%

- **Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Porcentaje de Vacíos:**

Según la norma, se estipula un porcentaje de vacíos entre 3 y 5% para vías de alto tráfico, en nuestro caso un 3.8% dando como porcentaje de PET Tipo 1 óptimo de 10%.

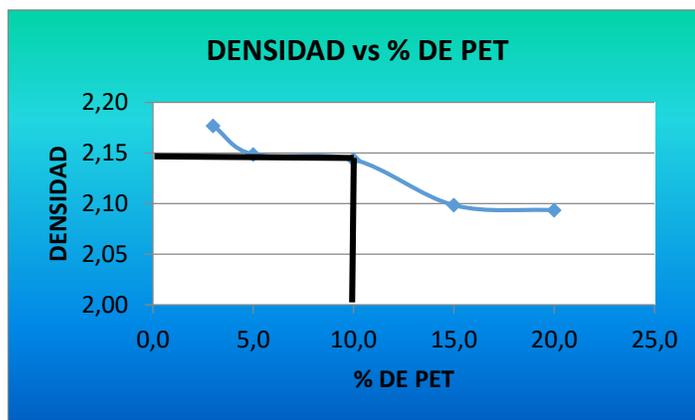
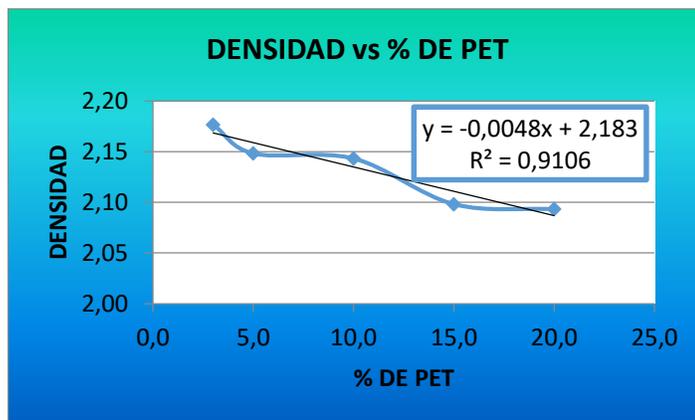
Figura: 4.14 % de FLUJO Vs % PET Triturado pasante del tamiz # 3/8 y retenido en el tamiz #4



En el gráfico se observa que el porcentaje de vacíos está en función al porcentaje de PET Triturado pasante del tamiz # 3/8 y retenido en el tamiz #4, es decir que a mayor porcentaje de PET Triturado pasante del tamiz # 3/8 y retenido en el tamiz #4, aumentara los vacíos en la carpeta asfáltica.

**Gráfico Porcentaje de PET Triturado vs Densidad:**

Figura: 4.15 % de Densidad Vs % PET Triturado pasante del tamiz # 3/8 y retenido en el tamiz #4

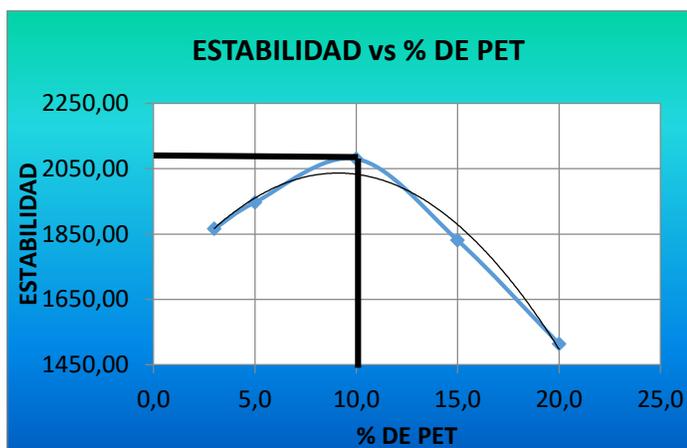
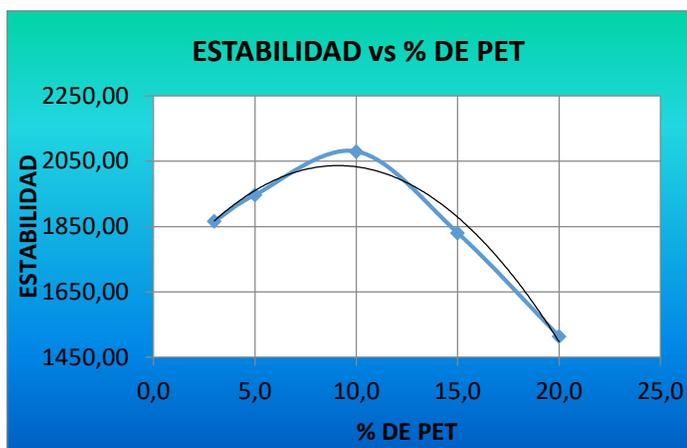


En el gráfico se observa que la densidad va disminuyendo en función al incremento de porcentaje de PET Triturado pasante del tamiz # 3/8 y retenido en el tamiz #4 que se añade a la mezcla.

• **Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Estabilidad:**

Según la norma se estipula una estabilidad mínima de 8006 N (816.37kg o 1800 lb) para vías de alto tráfico; en el caso actual se tiene una estabilidad de 2080lb para el porcentaje de PET Tipo 1 óptimo de 10% por lo aumenta en un 15.5% de la normativa.

Figura: 4.16 % de ESTABILIDAD Vs % PET Triturado pasante del tamiz # 3/8 y retenido en el tamiz #4

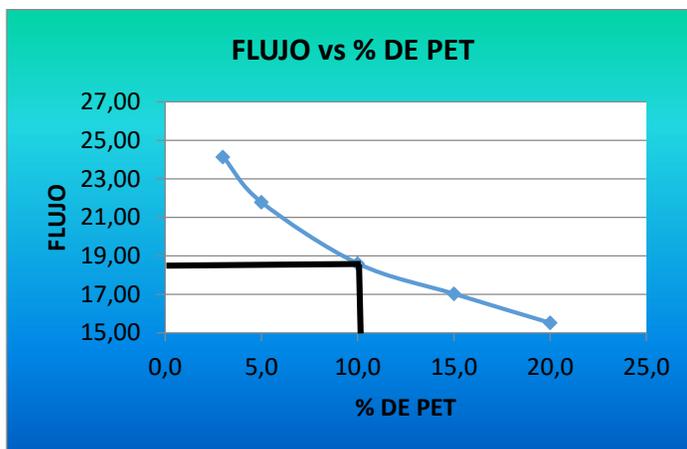
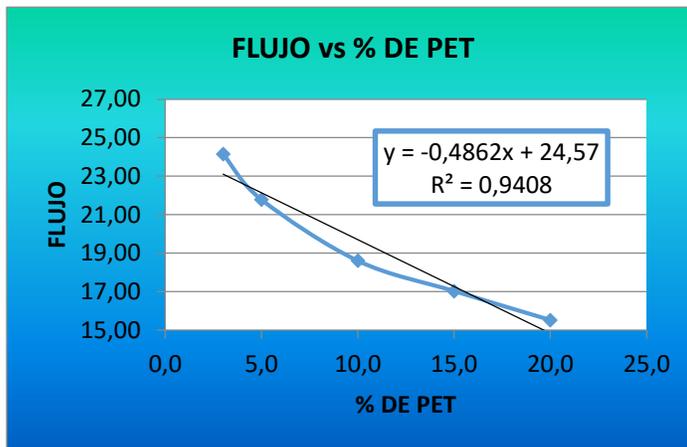


En el gráfico se observa que la estabilidad decrece a medida que el porcentaje de PET Triturado pasante del tamiz # 3/8 y retenido en el tamiz #4 aumenta, es decir que a mayor porcentaje de PET Triturado pasante del tamiz # 3/8 y retenido en el tamiz #4, menor será la estabilidad.

- **Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Flujo:**

Según la norma, se estipula un flujo a 0.25mm entre 8 y 14 para vías de alto tráfico; en el caso actual se tiene un flujo de 18.6 para el porcentaje de PET Tipo 1 óptimo de 10% por lo que no se cumple a cabalidad la normativa.

Figura: 4.17 % de FLUJO Vs % PET Triturado pasante del tamiz # 3/8 y retenido en el tamiz #4

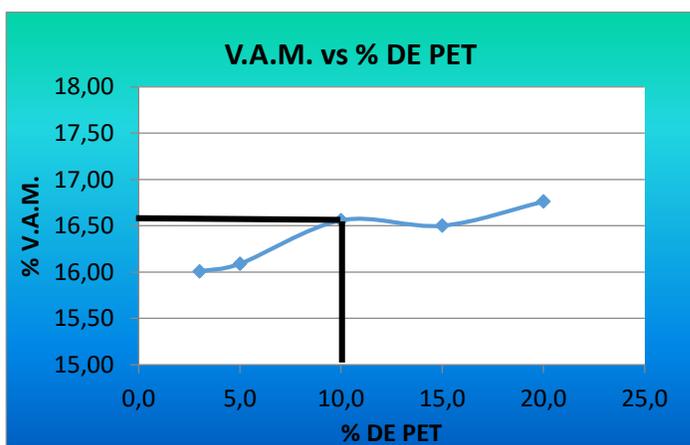
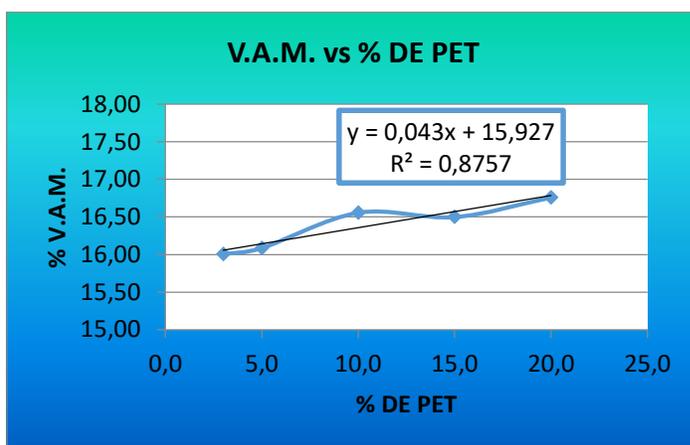


En el gráfico se observa que el flujo es proporcional al porcentaje de PET Triturado pasante del tamiz # 3/8 y retenido en el tamiz #4, es decir que a mayor porcentaje de PET Triturado pasante del tamiz # 3/8 y retenido en el tamiz #4, menor será el flujo

- **Gráfico Porcentaje de PET Triturado vs % de Vacíos de Agregado Mineral:**

Según la norma para criterios Marshall, en función de los vacíos de aire de diseño ( $V_a$ ) se estipula que el valor mínimo de porcentaje de vacíos de agregado mineral (VMA) es de 13% para un  $V_a$  de 3 a 5% y un tamaño máximo nominal de 19mm; por lo que el valor obtenido de 16.50% para el porcentaje de PET Tipo 1 igual a 10% cumple.

Figura: 4.18 % de V.A.M. Vs % PET Triturado pasante del tamiz # 3/8 y retenido en el tamiz #4

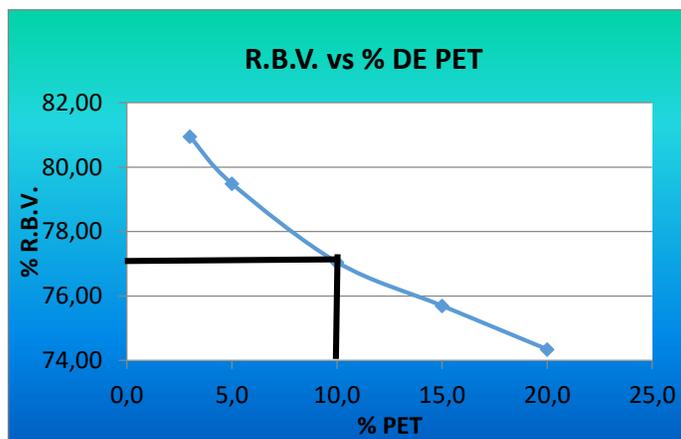
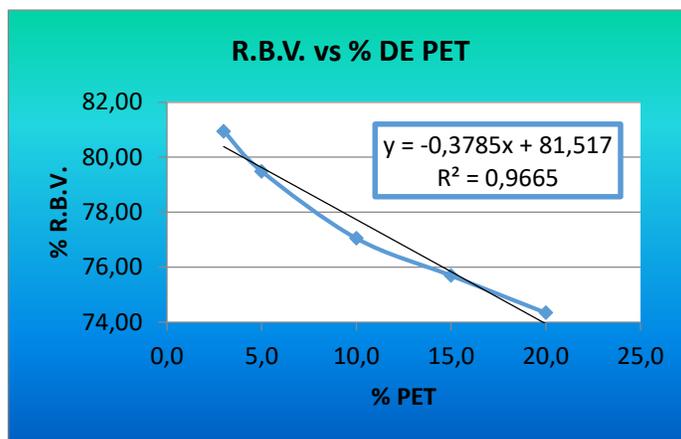


En el gráfico se observa que los Vacíos del Agregado Mineral aumentan en función que se incrementa los porcentajes de PET Triturado pasante del tamiz # 3/8 y retenido en el tamiz #4.

- **Gráfico Porcentaje de Asfalto vs Porcentaje de Vacíos Llenos de Asfalto:**

Según la norma se estipula un porcentaje de vacíos llenos de asfalto entre 75 y 82% para vías de alto tráfico; en el caso actual se tiene un valor de 75.70% para el porcentaje de PET Tipo 1 óptimo de 15% por lo que se cumple con la normativa.

Figura: 4.19 % de R.B.V. Vs % PET Triturado pasante del tamiz # 3/8 y retenido en el tamiz #4



En el gráfico se observa que la Relación Betun-Vacios es directamente proporcional al porcentaje de PET Triturado pasante del tamiz # 3/8 y retenido en el tamiz #4, es decir a mayor porcentaje de PET Triturado pasante del tamiz # 3/8 y retenido en el tamiz #4 menor será la Relación Betun-Vacios del Agregado Mineral.

### 3.4.4. EVALUACION DE UNA MEZCLA ASFALTICA ADICIONANDO PET TRITURADO PASANTE DEL TAMIZ #10 O RETENIDO EN EL TAMIZ #40

Se seleccionó como tamaño representativo para partícula fina al PET tipo 1 triturado pasante del tamiz #10 o retenido en el tamiz #40. El proceso de mezcla del material para este caso es idéntico al del caso anterior para luego seguir con la compactación y ensayo Marshall de acuerdo a la norma.

*Imagen 4.26: Tamizado del PET triturado pasante del tamiz #10 o retenido en el tamiz #40.*



*Imagen 4.27: Mezcla asfáltica añadiendo PET controlando la temperatura que no sea mayor a 140°C*



*Imagen 4.28: Rompimiento de la Briqueta*



*Fuente: Elaboración Propia*

TABLA 4.8. DE RESULTADOS DEL ENSAYO MARSHAL DE MEZCLA ASFALTICA ANADIENDO PET TRITURADO PASANTE DEL TAMIZ #10 O RETENIDO EN EL TAMIZ #40

pesos especificos		%de agregado		BETÚN			AGREGADO			%	NUMERO DE GOLPES 75										
				CEMENTO ASFALTICO 85-100			Grava	Gravilla	Arena												
Mat. Retenido Tamiz N	2,60	61,05	PESO ESPECIFICO TOTAL AASHTO T-228			10080	Grava	2,59	20												
Mat. Pasa Tamiz N°4	2,66	38,95					Gravilla	2,61	30												
peso especifico total	2,62	100					Arena	2,66	50												
UNIVERSIDAD AUTONOMA JUAN MISAEL SARACHO						FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA						FECHA 26 DE MAYO DE 2016									
DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFIA Y VIAS DE COMUNICACION						CARRERA DE INGENIERIA CIVIL (TARIJA-BOLIVIA)						LABORATORISTA: SELA CLAUDIA AVILAS ANDOVAL									
DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE METODO MARSHALL						PROYECTO: INVESTIGACIÓN DE PROYECTO DE GRADO PARA LA "OBTENCIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE BETÚN ADICIONAL PARA EL RECCLADO DE LA CARPETA ASFÁLTICA DE LA AVENIDA LA PAZ DE LA CIUDAD DE TARIJA"															
PET TRITURADO PASANTE DEL TAMIZ #10 O RETENIDO EN EL TAMIZ #40						AGREGADO SAN MATEO															
N° de probeta	altura de probeta	Peso Briqueta				Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacios			Estabilidad Marshall				Flujo				
		Total	seco	sat. Sup. Secc	sumergida en agua		probeta	densidad real	densidad promedio	densidad maxima	% de vacios mezela tota	V.A.M.[vacios agregado mineral]	R.B.V. [relacion betumen]	lectura del dial	carga	factor de correccion	carga real corregida	carga promedio	lectura dial del flujo	flujo real	flujo promedio
		%	grs.	grs.	grs.		cc	grs/cm <sup>3</sup>	grs/cm <sup>3</sup>	grs/cm <sup>3</sup>	%	%	%		libras		libras	libras	Pulg	-	-
1	64,00	1182,0	1188,5	651,0	537,5	2,20							1090	2917	0,943	2751	2372	450	0,1772		
2	6,20	1183,0	1188,2	650,0	538,2	2,20							1100	2944	1,040	3062		440	0,1732		
3	6,30	1184,1	1189,6	649,0	540,6	2,19	2,20	2,394	3,20	16,28	80,34		1150	3078	1,013	3119		430	0,1693	24,1	
4	6,40	1180,3	1185,4	648	537,4	2,20							1050	2809	0,988	2774		420	0,1654		
5	6,50	1181,3	1186,7	650	536,7	2,20							1030	2755	0,963	2652		410	0,1614		
6	6,50	1184,3	1190,2	651	539,2	2,20							1020	2728	0,963	2626		400	0,1575		
7	6,4	1184,2	1191,3	647	544,3	2,18							920	2459	0,988	2428		380	0,1496		
8	6,3	1185,6	1192,5	646	546,5	2,17							930	2486	1,013	2518		390	0,1535		
9	6,3	1186,2	1193,6	645	548,6	2,16	2,17	2,394	3,50	16,41	78,67		900	2405	1,013	2437		350	0,1378	21,6	
10	6,5	1186,5	1192,7	647	545,7	2,17							960	2567	0,963	2471		370	0,1457		
11	6,3	1184,6	1190,7	645	545,7	2,17							920	2459	1,013	2491		380	0,1496		
12	6,2	1185,7	1193,6	644	549,6	2,16							920	2459	1,040	2558		390	0,1535		
13	6,1	1188,6	1196,8	643	553,8	2,15							980	2621	1,071	2807		350	0,1378		
14	6,3	1189,6	1196,3	645	551,3	2,16							990	2648	1,013	2682		360	0,1417		
15	6,2	1190,1	1197,7	644	553,7	2,15							920	2459	1,040	2558		340	0,1339		
16	6,3	1188,3	1196,1	645	551,1	2,16	2,15	2,394	3,70	16,51	77,59		960	2567	1,013	2600		340	0,1339	16,7	
17	6,3	1189,7	1195,6	642	553,6	2,15							950	2540	1,013	2573		330	0,1299		
18	6,0	1192,2	1198,3	644	554,3	2,15							930	2486	1,013	2742		370	0,1457		
19	6,3	1190,3	1199,3	638	561,3	2,12							990	2648	1,013	2682		390	0,1535		
20	6,4	1192,5	1198,4	637	561,4	2,12							1005	2688	0,988	2654		320	0,1260		
21	6,3	1193,3	1198,8	637	561,8	2,12							1010	2702	1,013	2737		300	0,1181		
22	6,3	1192,5	1198,3	639	559,3	2,13	2,13	2,394	4,01	16,67	75,94		1050	2809	1,013	2846		310	0,1220	14	
23	6,4	1193,1	1199,3	638	561,3	2,13							1060	2836	0,988	2801		310	0,1220		
24	6,3	1192,5	1198,8	640	558,8	2,13							970	2594	1,013	2628		320	0,1260		
25	6,5	1195,6	1203,3	635	568,3	2,10							940	2513	0,963	2419		280	0,1102		
26	6,3	1197,8	1205,2	635	570,2	2,10							970	2594	1,013	2628		330	0,1299		
27	6,6	1192,3	1201,1	634	567,1	2,10	2,10	2,394	4,20	16,70	74,85		950	2540	0,943	2396		350	0,1378	12,2	
28	6,4	1193,5	1202,3	636	566,3	2,11							960	2567	0,988	2535		310	0,1220		
29	6,3	1199,5	1206,3	635	571,3	2,10							940	2513	1,013	2546		300	0,1181		
30	6,4	1196,3	1204,4	634	570,4	2,10							970	2594	0,988	2561		290	0,1142		
especificacion		minimo							3	13	75					1800			8		
		maximo							5		82								14		

TABLA 4.9. DE RESULTADOS DEL ENSAYO MARSHALL PARA EL CONTENIDO OPTIMO DE PET TIPO TRITURADO PASANTE DEL TAMIZ #10 O RETENIDO EN EL TAMIZ #40

<b>PORCENTAJE DE PET</b>	<b>DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>ESTABILIDAD (libras)</b>	<b>FLUJO</b>	<b>% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)</b>	<b>R.B.V. (RELACIÓN BETÚN VACIOS) (%)</b>	<b>V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)</b>
<b>3,0</b>	2,20	2372	24,1	3,20	80,34	16,28
<b>5,0</b>	2,17	2484	21,6	3,50	78,67	16,41
<b>10,0</b>	2,15	2660	16,7	3,70	77,59	16,51
<b>15,0</b>	2,13	2725	14,0	4,01	75,94	16,67
<b>20,0</b>	2,10	2514	12,2	4,20	74,87	16,71

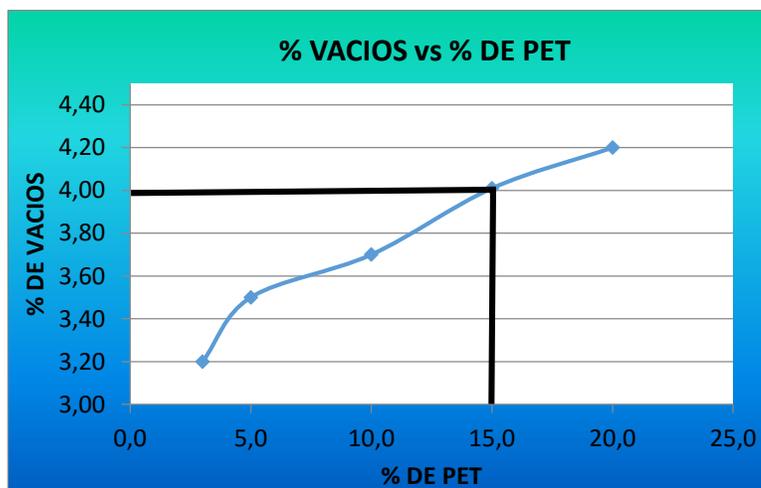
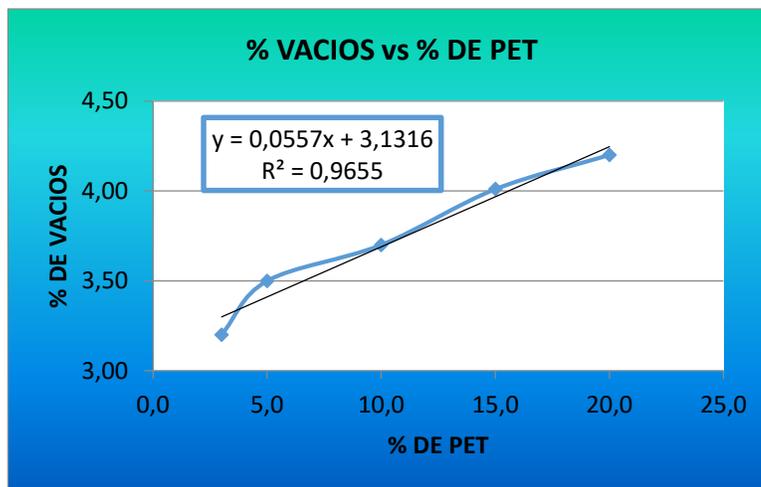
Para el análisis de la cantidad de PET Tipo 1 óptimo triturado y retenido en el tamiz #40 se siguieron los conceptos anteriormente utilizados como se muestra a continuación:

Para un porcentaje optimo de Betun del 6% el porcentaje optimo de PET Triturado pasante del tamiz #10 o retenido en el tamiz #40 es de 15%

- **Gráfico Porcentaje de PET Triturada vs Porcentaje de Vacíos:**

Según la norma, se estipula un porcentaje de vacíos entre 3 y 5% para vías de alto tráfico por lo que se selecciona un valor intermedio de 4% dando como porcentaje de PET Tipo 1 óptimo entre un rango de 15%.

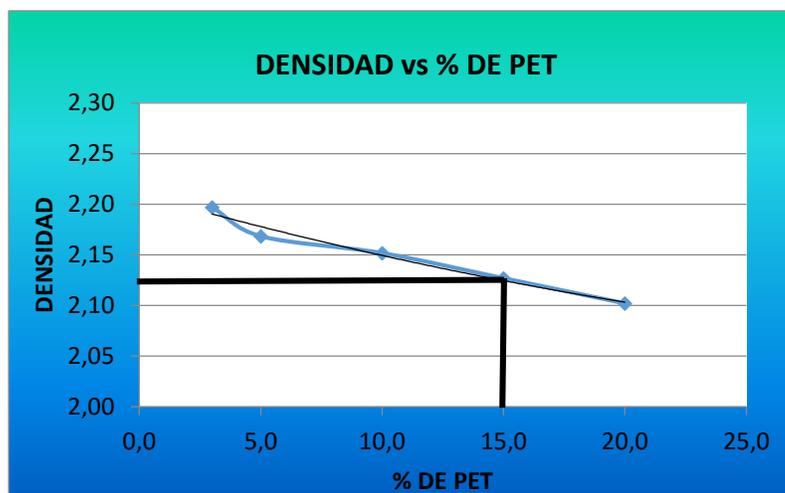
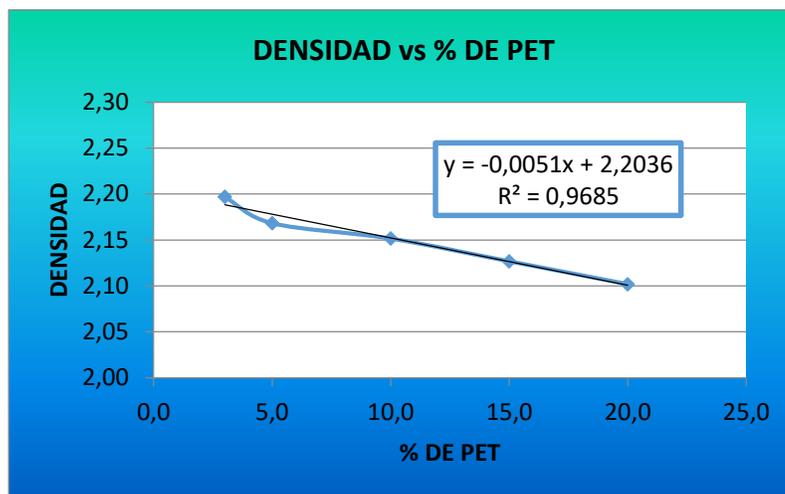
Figura: 4.20 % de VACIOS Vs % PET Triturado pasante del tamiz #10 o retenido en el tamiz #40



En el gráfico se observa que el porcentaje de vacíos es inversamente proporcional al porcentaje de PET Triturado pasante del tamiz #10 o retenido en el tamiz #40, es decir que a mayor porcentaje de PET Triturado pasante del tamiz #10 o retenido en el tamiz #40, aumenta los vacíos en la mezcla asfáltica.

- **Gráfico Porcentaje de PET Triturado vs Densidad:**

Figura: 4.21 % de DENSIDAD Vs % PET Triturado pasante del tamiz #10 o retenido en el tamiz #40

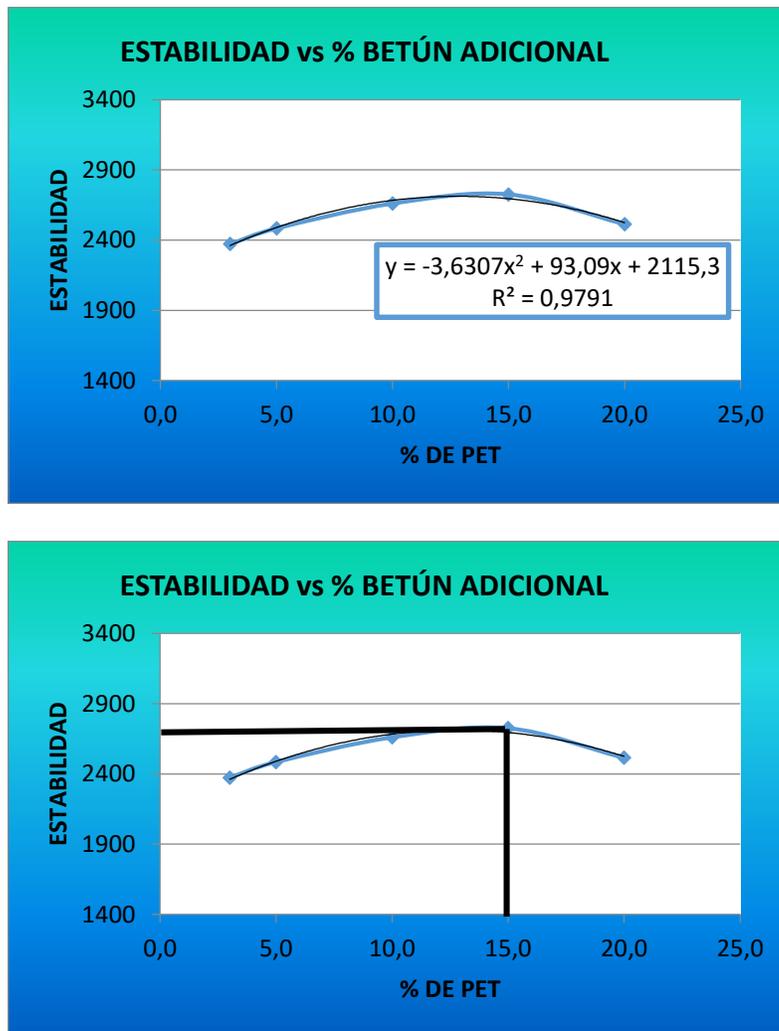


En el gráfico se observa que la densidad es directamente proporcional al porcentaje de PET Triturado pasante del tamiz #10 o retenido en el tamiz #40, es decir que a mayor porcentaje de PET Triturado pasante del tamiz #10 o retenido en el tamiz #40, menor será la densidad.

- **Gráfico Porcentaje de PET Triturado vs Estabilidad:**

Según la norma, se estipula una estabilidad mínima de 8006N (816.37kg o 1800 lb) para vías de alto tráfico; en el caso actual se tiene una estabilidad de 2725lb para el porcentaje de PET Tipo 1 óptimo de 15% por lo que se cumple la normativa.

Figura: 4.22 % de ESTABILIDAD Vs % PET Triturado pasante del tamiz #10 o retenido en el tamiz #40

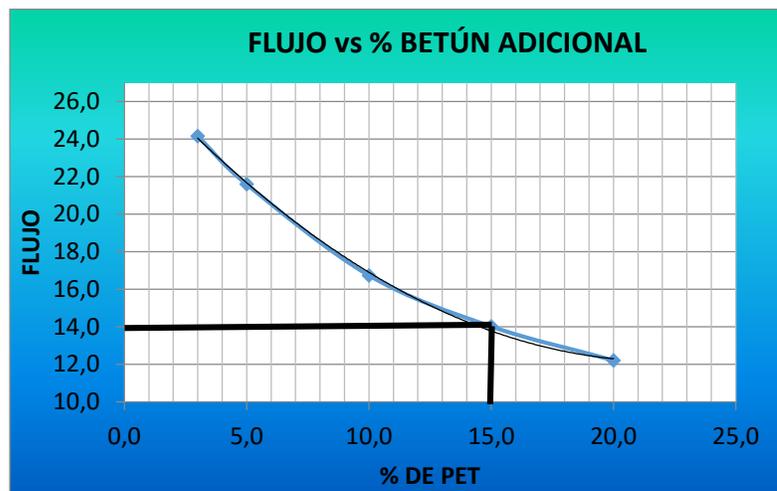
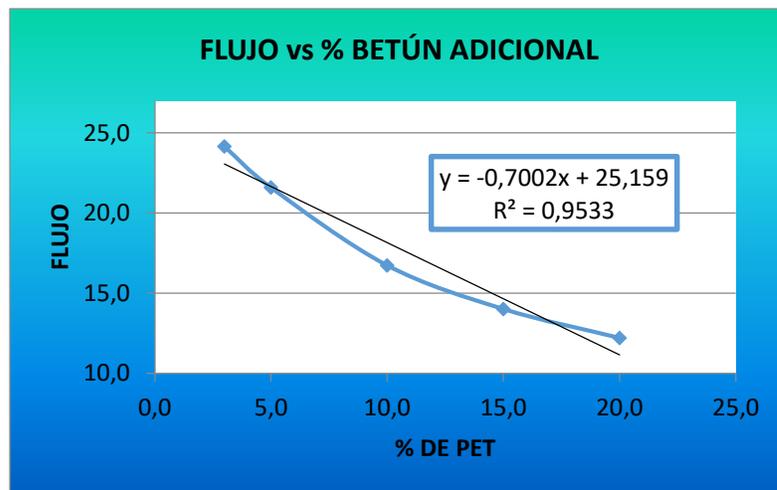


En el grafico se observa que la estabilidad crece a medida que el porcentaje de PET Tipo Triturado aumenta, sin embargo en el grafico se observa que llega un punto que decae la estabilidad, lo que significa que no se debe exceder el % óptimo de PET Triturado.

- **Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Flujo:**

Según la norma, se estipula un flujo a 0.25mm entre 8 y 14 para vías de alto tráfico; en el caso actual se tiene un flujo de 14 para el porcentaje de PET Tipo 1 óptimo de 15% por lo que no se cumple a cabalidad la normativa.

Figura: 4.23 % de FLUJO Vs % PET Triturado pasante del tamiz #10 o retenido en el tamiz #40

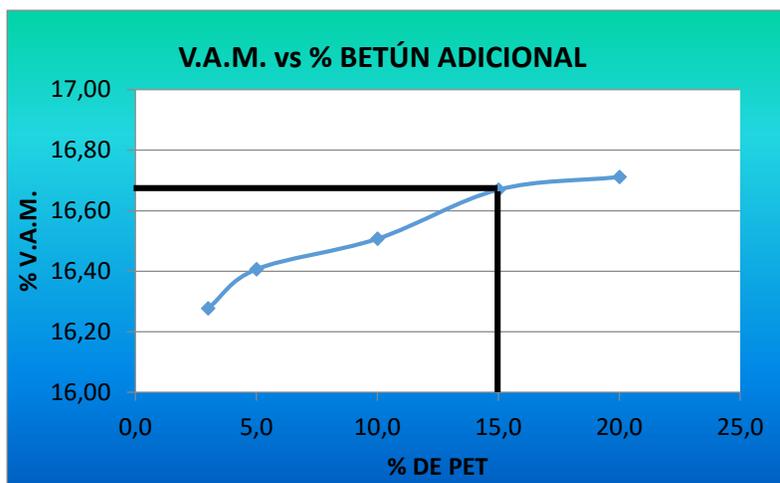
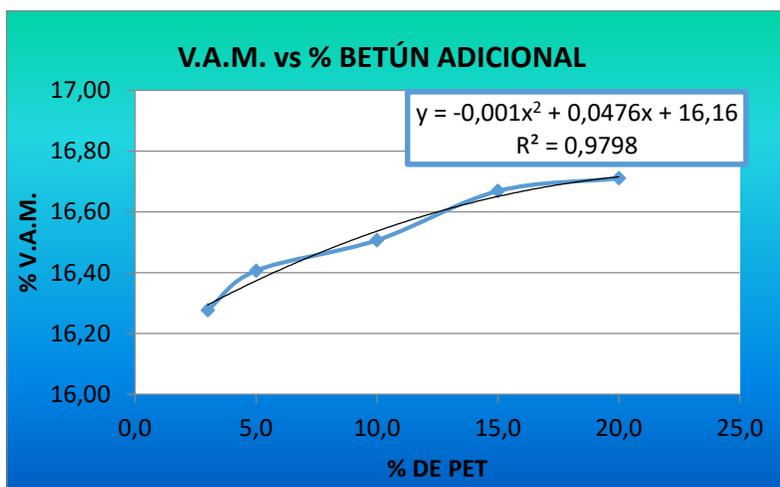


En el gráfico se observa que a mayor porcentaje de PET Triturado pasante del tamiz #10 o retenido en el tamiz #40, menor será el flujo

• **Gráfico Porcentaje de PET Triturado vs % de Vacíos de Agregado Mineral:**

Según la norma para criterios Marshall, en función de los vacíos de aire de diseño ( $V_a$ ) se estipula que el valor mínimo de porcentaje de vacíos de agregado mineral (VMA) es de 13% para un  $V_a$  de 4% y un tamaño máximo nominal de 19mm; por lo que el valor obtenido de 16.67% para el porcentaje de PET Tipo 1 igual a 15% cumple.

Figura: 4.24 % de V.A.M. Vs % PET Triturado pasante del tamiz #10 o retenido en el tamiz #40

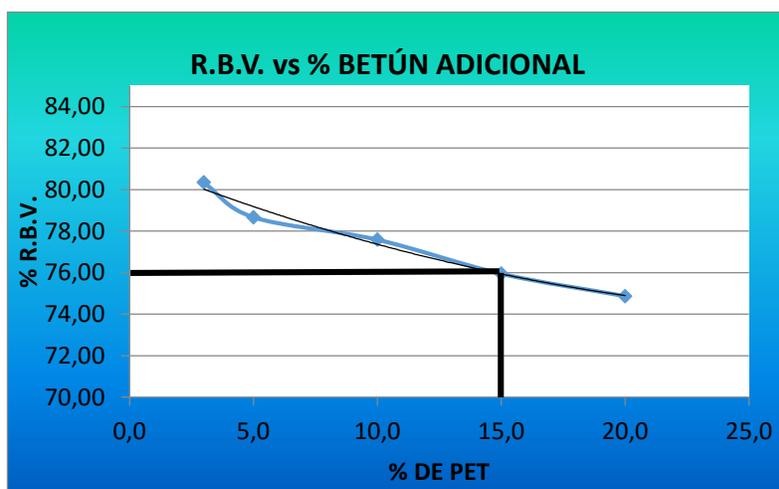
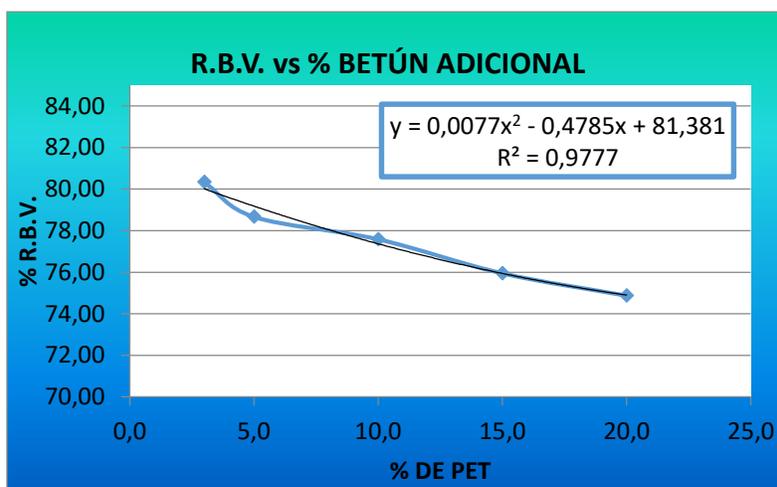


En el gráfico se observa que los Vacíos del Agregado Mineral va aumentando según es mayor porcentaje de PET Triturado pasante del tamiz #10 o retenido en el tamiz #40 es añadido a la mezcla asfáltica.

- **Gráfico Porcentaje de Asfalto vs Porcentaje de Vacíos Llenos de Asfalto:**

En la norma, se estipula un porcentaje de vacíos llenos de asfalto entre 75 y 82% para vías de alto tráfico; en el caso actual se tiene un valor de 71% para el porcentaje de PET Tipo 1 óptimo de 15% por lo que se cumple con la normativa.

Figura: 4.25 % de R.B.V. Vs % PET Triturado pasante del tamiz #10 o retenido en el tamiz #40



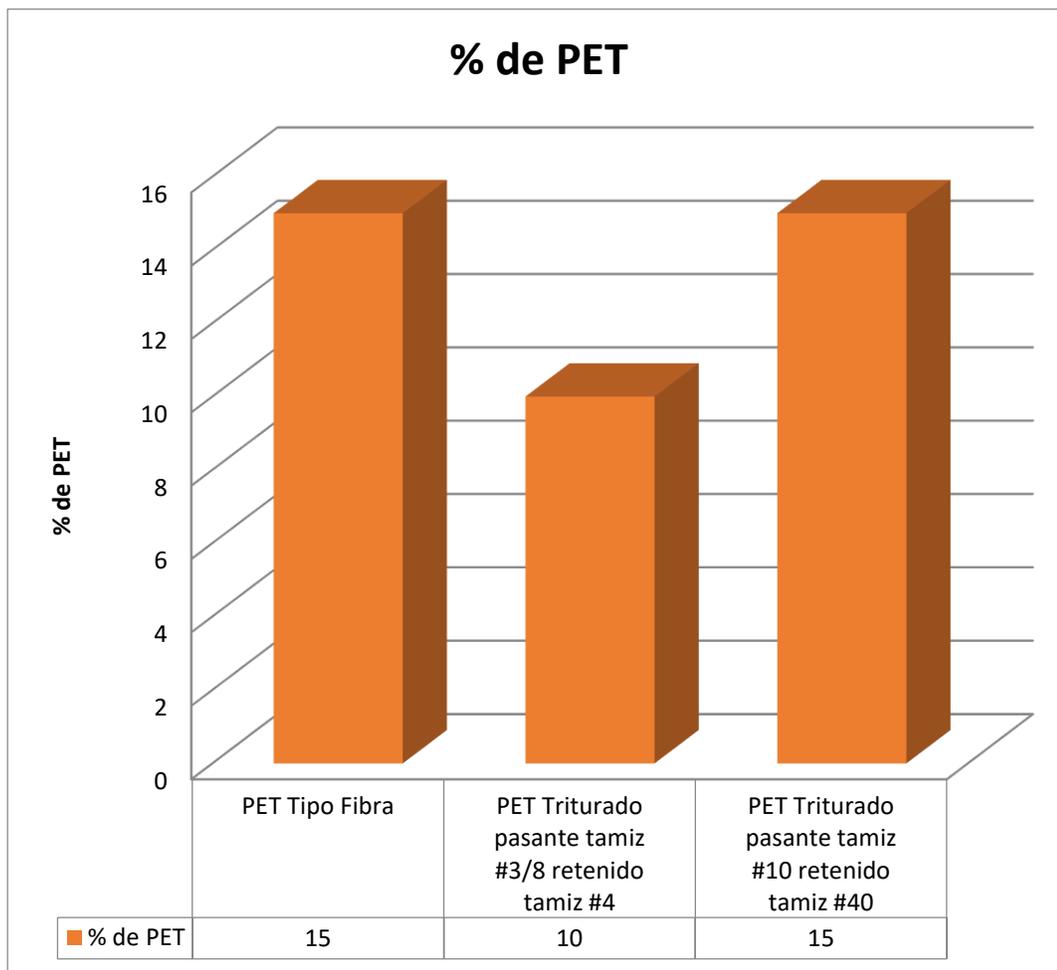
En el gráfico se observa que la Relación Betun-Vacios es directamente proporcional al porcentaje de PET Triturado, es decir a mayor porcentaje de PET Triturado pasante del tamiz #10 o retenido en el tamiz #40 menor será la Relación Betun-Vacios del Agregado Mineral

### 3.4.5. COMPARACIÓN DE ESTABILIDADES Y FLUJOS

TABLA 4.14 Resumen de resultados obtenido de los ensayos realizados

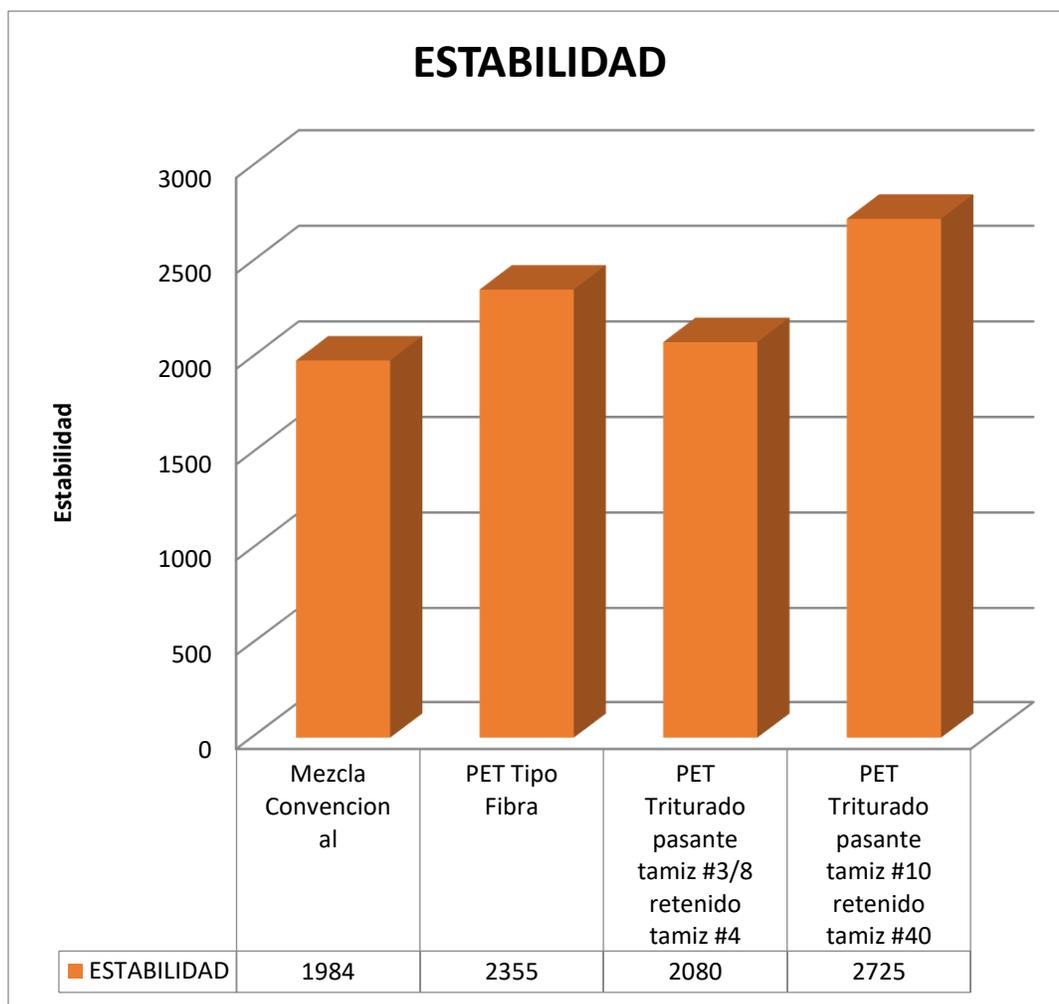
Característica de la muestra	% Optimo de PET	Estabilidad (lb)	Flujo
Mezcla Convencional	-----	1984	14
PET dispuesto en fibra	15	2355	23.5
PET triturado pasante tamiz 3/8" y retenido en tamiz #4	10	2080	18.6
PET triturado pasante tamiz N°10 y retenido en tamiz N°40	15	2725	14

Figura: 4.25 % OPTIMO DE PET



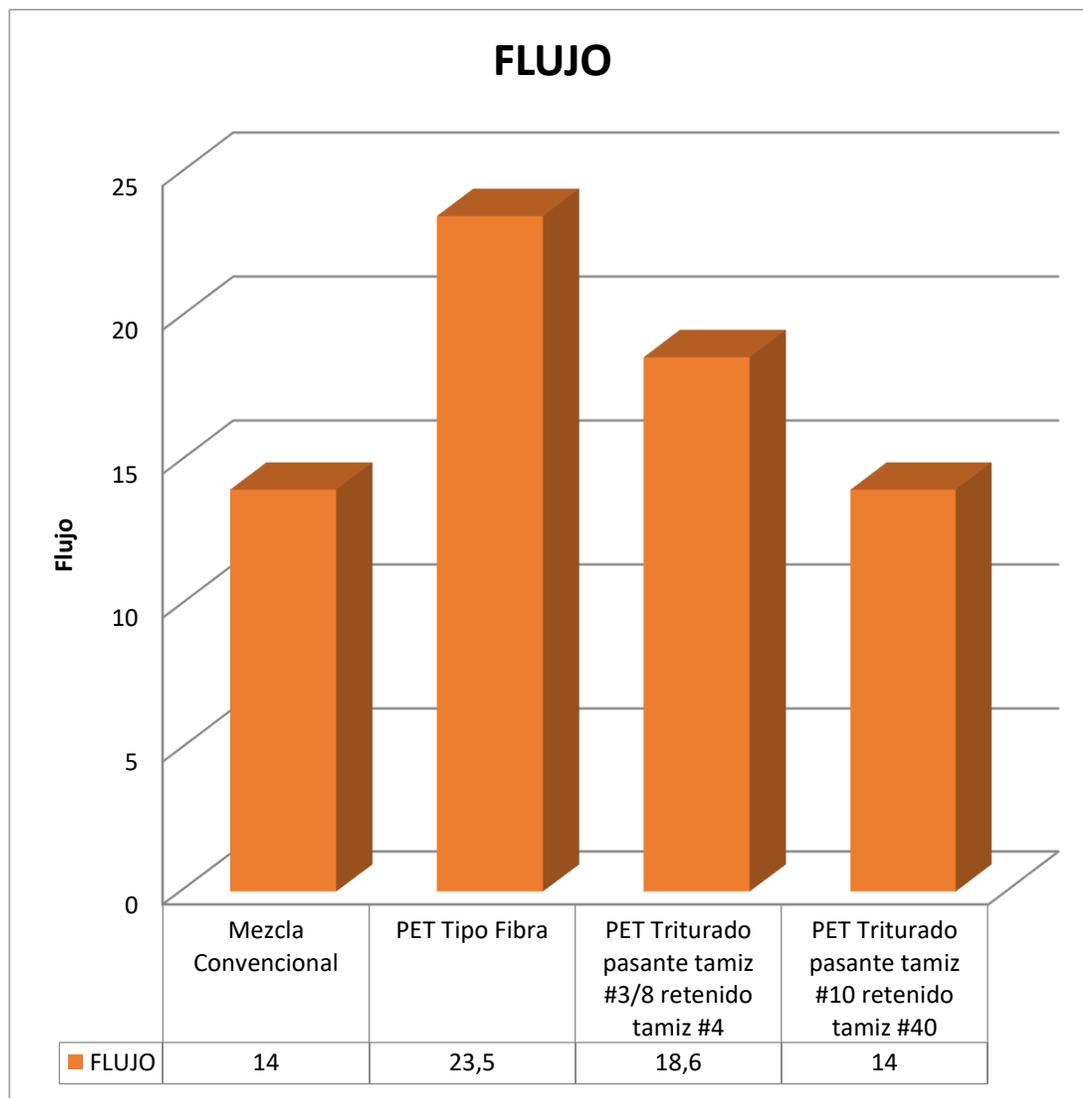
Como se observa en la figura 4.25 los porcentajes óptimos de PET que son añadidos a la mezcla asfáltica varían de acuerdo al tamaño y forma, el PET Triturado pasante tamiz # 3/8 retenido tamiz #4 es el que menor porcentaje presenta para añadir a la mezcla asfáltica convencional. Mientras que el PET Tipo Fibra y el PET triturado pasante tamiz #10 retenido tamiz #40 son los que mas material requieren para ser añadido a la mezcla asfáltica.

Figura: 4.26 % COMPARACIONES DE LA ESTABILIDAD DEL ENSAYO MARSHALL



Como se observa en el grafico el PET Triturado pasante tamiz #10 retenido tamiz #40 tiene la mayor Estabilidad a comparación de los demás ensayos, y el de menor Estabilidad es la mezcla convencional.

Figura: 4.28 % COMPARACIONES FLUJO DEL ENSAYO MARSHALL



Al observar la gráfica 4.28 el flujo del PET Tipo Fibra tiene el mayor flujo y el que cumple con la norma es la mezcla asfáltica añadiendo PET Triturado pasante tamiz N 10 y retenido tamiz N 40, como también cumple la mezcla convencional.

EVALUACION TECNICO – ECONOMICO - AMBIENTAL DE UNA MEZCLA  
ASFALTICA AÑADIENDO PET

EVALUACION TECNICA

	PORCENTAJE	ESTABILIDAD	FLUJO	ANALISIS
PET TIPO FIBRA	3	1301	15	Comparando los resultados se observa que el porcentaje de 15% de PET TIPO FIBRA es el que tiene mayor estabilidad, pero cabe notar que el flujo está por encima de lo establecido por norma.
	5	1711	19	
	10	2218	21	
	<b>15</b>	<b>2355</b>	<b>23</b>	
	20	2143	26	
PET TRITURAD O PASANTE DEL TAMIZ # 3/8 Y RETENIDO EN EL TAMIZ #4	3	1866	24	Como se observa en el cuadro podemos decir que el porcentaje de 10% PET TRITURADO PASANTE DEL TAMIZ # 3/8 Y RETENIDO EN EL TAMIZ #4 fibra que tiene mejores resultados dentro de una mezcla asfáltica
	5	1945	21	
	<b>10</b>	<b>2080</b>	<b>18</b>	
	15	1831	17	
	20	1514	15	
PET TIPO TRITURAD O PASANTE DEL TAMIZ #10 O RETENIDO EN EL TAMIZ #40	3	2372	24	Como se observa todos los porcentajes de PET TIPO TRITURADO PASANTE DEL TAMIZ #10 O RETENIDO EN EL TAMIZ #40 presentan valores superiores en estabilidad en comparación a lo establecido por norma, pero se eligió la mezcla que contiene 15% de PET por lo que es el valor mas alto en estabilidad y su flujo esta dentro del rango establecido por norma.
	5	2484	21	
	10	2660	16	
	<b>15</b>	<b>2725</b>	<b>14</b>	
	20	2514	12	

## EVALUACION ECONOMICA:

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
PROYECTO:	PLANTA TRUTURADORA DE PET	FECHA:	AGOSTO	N°	
		CANTIDAD:	1	ACTIVIDAD	
UNIDAD:	pza	MONEDA:	Bs 6,96		
N°	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	RENDIMIENTO	PRECIO UNITITARIO	PRECIO PARCIAL
1.-	<b>MATERIALES</b>				
	Planta de Trituración	pza	1	174000,00	174000,00
		1.- TOTAL MATERIALES			174000,00
2.-	<b>PERSONAL</b>				
	Administrador	hr	8	12,5	100,00
	Operador de Maquina	hr	8	8,50	68,00
	Ayudante	hr	8	8,00	64,00
	Ayudante	hr	8	8,00	64,00
	Sereno	hr	8	8,00	64,00
					0,00
					0,00
		SUB TOTAL MANO DE OBRA			260,00
	<i>Cargas sociales 55% del subtotal mano de obra</i>				143,00
	<i>Impuestos IVA mano de obra 14,94% de suma de subtotal mano de obra + cargas sociales</i>				60,21
		2.- TOTAL MANO DE OBRA			463,21
3.-	<b>HERRAMIENTAS Y EQUIPO</b>				
					0,00
					0,00
					0,00
	<i>Desgaste de herramientas 5% del total mano de obra</i>				23,16
		3.- TOTAL HERR. Y EQUIPO			23,16
4.-	<b>GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS</b>				
	<i>Gastos generales 10% de 1+2+3</i>				17448,64
		4.- TOTAL GASTOS GRALES.			17448,64
5.-	<b>UTILIDAD</b>				
	<i>Utilidad 10% de 1+2+3+4</i>				19193,50
		5.- TOTAL UTILIDAD			19193,50
6.-	<b>IMPUESTOS</b>				
	<i>Impuestos IT 3,09% de 1+2+3+4+5</i>				6523,87
		6.- TOTAL IMPUESTOS			6523,87
	<b>TOTAL PRECIO UNITARIO 1+2+3+4+5+6</b>				<b>217652,38</b>

Costo de Botella de PET reciclada = 1.5 Bs/Kg.

Costo de Botella de PET Triturada = 10 Bs/Kg

Para un porcentaje de 15 % de PET del contenido óptimo de Betun del 6% es igual a 10 grs.

Para un kilogramos de mezcla asfáltica necesito 10 gr. de PET.

Para una tonelada de mezcla asfáltica necesito 1 Kg de PET

ECONOMICO	MEZCLA ASFALTICA CONVENCIONAL	MEZCLA ASFALTICA CON POLIMERO	MEZCLA ASFALTICA AÑADIENDO PET
COSTO (BS)	850 \$US/ Tonelada	1250 \$US/ Tonelada	855\$US/ Tonelada

## EVALUACION AMBIENTAL.

AMBIENTAL	CONTAMINACION	RECICLAJE
<p>Las plantas recicladoras utilizan bastante agua y detergente para la limpieza de las botellas, en la actualidad se hay plantas que reutilizan estas aguas para el mismo proceso, a la semana se utilizan unos 5000lt de agua.</p> <p>Estas aguas desembocaran en el sistema de alcantarillado para luego ser tratadas adecuadamente sin dañar el medio ambiente</p>	<p>Cada año Bolivia genera 1.7 millones de tonelada de residuos sólidos, 21% corresponde a material reciclable el cual solo se recicla el 2.8%.</p> <p>Cada habitante genera medio kilogramo de residuo solido en 24hrs</p>	<p>Cada día se recupera 175 toneladas de material reciclable en cual corresponde un 40% a las botellas de PET.</p> <p>Se reduce en un 50% del espacio que ocupan los desperdicios cuando se convierten en basura, se genera más ganancia económica y genera fuentes de empleo y lo más importante vivir en un mundo mas limpio</p>

## FACTIBILIDAD DEL PROYECTO

TECNICO	Mezcla asfáltica convencional	Mezcla asfaltica añadiendo PET
	<p>Por norma se tiene un parámetro mínimo que se debe cumplir para la Estabilidad que es de 1800 lb el cual observamos que muestra tiene una Estabilidad de 1984 lb lo que indica un incremento del 10% del parámetro minimo.</p> <p>En cuanto al Flujo se observa que se encuentra dentro de los parámetros establecidos</p>	<p>Asiendo la comparación con los parámetros establecidos por norma se observa que este tipo de mezcla asfaltica adicionando PET tiene un incremento del 51% al parámetro minimo de Estabilidad.</p> <p>En cuanto al flujo se observa que esta dentro de las especificaciones mínimas establecidas por norma.</p> <p>La introducción de PET en una mezcla asfaltica no tiene mayores inconvenientes, pues se lo realiza en forma mecánica en el momento del mezclado de los agregados y Betun</p>
ECONOMICO	Mezcla Asfáltica con Polímero	Mezcla Asfáltica añadiendo PET

	El costo de esta mezcla asfáltica convencional cuesta 850 \$US encuentra en la actualidad en cambio una mezcla con polímero cuesta 1250\$uS la tonelada, lo que significa un incremento en el costo de 47% por tonelada.	El costo de esta mezcla asfáltica esta alrededor de 855\$US la tonelada.  El cual significa un aumento de un 5% en el costo por tonelada.  Al adquirir una planta de triturado solo se incrementa en un 21.7% del presupuesto inicial.
AMBIENTAL	<p>Como ya se mostro en los datos indicadores, Bolivia genera bastante residuos sólidos, y entre estos se encuentra el PET que significa un 40% del total de estos residuos, y esto implica que ocupará un 50% de espacio en los rellenos sanitarios.</p> <p>Este material es muy dañino para el medio ambiente el cual tarda mucho tiempo en biodegradarse y también es foco de criaderos de mosquitos que causan enfermedades, hasta en casos de muerte.</p>	

## CONCLUSION

Al reciclar PET este material podemos darle un uso técnico introduciendo a la mezcla asfáltica, aumentado su vida útil de los caminos reduciendo en los costos de mantenimiento, regenerar fuentes de trabajo y también a mitigar en parte el daño ocasionado al medio ambiente por este producto.

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### CONCLUSIONES

- De acuerdo a los resultados presentados en la presente investigación, se puede observar que el PET triturado retenido en el tamiz #4 y pasante del tamiz 3/8", con un porcentaje optimo de PET de 10% en función al contenido optimo de

Betun, presenta valores superiores en estabilidad de 15.5% al compararlo con lo establecido en norma, y a su vez el valor es superior del flujo a la briqueta tradicional no cumpliendo los límites de la norma, por lo tanto, se puede concluir que esta forma de incorporar el Tereftalato de Polietileno podría ser usada en calles de mediano tráfico.

- Al comparar muestras de mezclas asfálticas convencionales las cuales contienen un porcentaje óptimo de asfalto del 6%, con briquetas a la cuales se le incorporó un porcentaje óptimo de PET tipo fibra del 15% en función al porcentaje óptimo de Betún, se observó que las briquetas presenta un valor superior de 30% de estabilidad y 40% de flujo, concluyendo así que se obtuvo una mezcla asfáltica más resistente pero a su vez con mayor capacidad de deformación.
- Para el caso de las briquetas elaboradas con PET triturado retenido en el tamiz #40 y pasante del tamiz #10, con un porcentaje óptimo de PET del 15% en función del porcentaje óptimo de asfalto, presentaron una estabilidad superior en un 51% y un flujo de 14% el cual está dentro de la normativa, por lo que se concluye que esta es la mejor manera de añadir al mismo como material constitutivo, además que es la forma de introducir el PET tipo 1 entre las tres formas analizadas, pudiendo ser utilizadas esta mezcla en carreteras de alto tráfico.
- Con la siguiente investigación se concluyó que la Estabilidad y Flujo Marshall dependerán en función a los porcentajes de PET añadido a la mezcla asfáltica y en sus distintos tamaños.
- Se elaboraron briquetas de mezcla asfáltica convencional, que se sometieron a ensayos Marshall para determinar sus propiedades físicas y mecánicas, y se realizó el mismo procedimiento con briquetas de mezcla asfáltica modificada con PET para determinar su Estabilidad y Flujo.

- Las propiedades de las mezclas asfálticas añadiendo PET, siguen las tendencias establecidas en la bibliografía para las mezclas asfálticas convencionales, obedeciendo un comportamiento en función únicamente del contenido de asfalto adicionado y de PET a la mezcla.
- La caracterización del cemento asfáltico convencional es fundamental, ya que su cumplimiento nos ofrece la garantía de que la mezcla tendrá buenas propiedades, también es muy importante la caracterización del agregado pétreo puesto que este estudio nos dará a conocer las propiedades físicas –mecánicas como la granulometría adecuada para la mezcla asfáltica.

## **RECOMENDACIONES**

- Es recomendable que al manejar e introducir el PET tipo fibra se tengan dimensiones mayores a 3mm de ancho pues dimensiones menores no resisten el calor de la mezcla y compactación de una briqueta ocasionando que las fibras se deformen en exceso y pierdan desde su longitud hasta su consistencia y por ende de una mezcla asfáltica con menos Estabilidad y mayor Flujo,

- De igual forma, con respecto al PET Tipo 1 dispuesto en forma de fibra, se recomienda que sea perpendicular al efecto de la carga de los vehículos para aprovechar en su totalidad la resistencia a flexión y sobre todo a tracción ofrecidos por cada fibra. En vista que se mejora la Estabilidad pero el flujo alto es recomendable usar este tipo de mezcla destinadas principalmente a tráfico liviano.
- En obra, se recomienda que el plástico sea añadido a la mezcla cuando ésta sale de las tolvas de mezclado de la planta y la temperatura disminuye; esto queda claro ya que se pueden alcanzar los 180°C dentro de las tolvas y por ende se podría afectar las propiedades del PET que se pierden por sobre los 170°C.
- En laboratorio es importante controlar la temperatura al momento de realizar la mezcla añadiendo el PET, pues este factor es importante pudiendo alterar las propiedades del PET y así no tener buenos resultados
- Se recomienda que al trabajar con mezcla asfáltica a temperaturas altas se utilice el equipo necesario de seguridad para su manipuleo: guantes de cuero o lona, ropa adecuada de preferencia un overol y barbijo para evitar la inhalación de gases.

# ANEXOS

## ANEXO 1

### A.1 CARACTERIZACION DE LOS AGREGADOS

#### A.1.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

#### DISEÑO GRANULOMÉTRICO PARA LA MEZCLA ASFÁLTICA

## **(DOCUMENTO REFERENCIAL ASTM D422 – AASHTO T88)**

### **INTRODUCCIÓN**

Granulometría es la separación de las partículas de un agregado cualquiera de acuerdo a su tamaño. El uso de tamices normados nos permite saber cuánta cantidad de material existe en una muestra dada para cada tamaño propuesto por la norma.

### **Objetivo**

Este ensayo tiene por objeto determinar la granulometría de los agregados hasta el tamiz #200, mediante su división y separación con una serie de tamices en fracciones granulométricas de tamaño decreciente.

### **Equipo y Materiales**

**Tamiz:** un tamiz es simplemente una malla de filamentos metálicos entrecruzados, el cual se lo utiliza para separar las partes gruesas de las finas.

**Bandejas y taras:** elementos auxiliares del laboratorio para colocación del material.

**Balanza:** es un instrumento que sirve para medir el peso de un objeto. Para el ensayo de granulometría se necesita una balanza cuya precisión sea de  $\pm 0.01$  gr para evitar errores de aproximación.

### **PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:**

a) Antes de realizar el ensayo se debe preparar la muestra, para lo cual se debe separar mediante cuarteo la cantidad necesaria hasta obtener una muestra representativa. Según la norma ASTM D 422 se obtendrá de la siguiente tabla:

Tabla A:1 Peso aprox. en función del tamaño máximo nominal.

Tamaño Máximo Nominal de la Partícula		Peso mínimo aprox. de la Porción
mm	plg	Kg
9.5	3/8	0.5
25	1	2
50	2	4
75	3	5

Fuente: norma ASTM D422

En nuestro caso para un tamaño nominal de  $\frac{3}{4}$  plg tenemos alrededor de 5 Kg de material.

**b)** A continuación se lava el material para separar las partículas finas que pueden estar pegadas a las gruesas y para retirar la materia orgánica que puede contaminar el ensayo.

**c)** Verter el material lavado y secado en el juego de tamices previamente ensamblados y dispuestos, de arriba abajo, en orden decreciente de tamaños de abertura con el fondo y la tapa. El orden de los tamices a utilizar tanto para muestra de agregado grueso y fino es el siguiente:

Tabla A:2 Características de Tamices Norma ASTM E-11/95

Descripción	Diámetro	Nº	Diámetro	Uso
Tamices Norma	8"	2"	50,00 mm	Retenido
Tamices Norma	8"	1 1/2"	37,50 mm	Agregado grueso
Tamices Norma	8"	1"	25,00 mm	
Tamices Norma	8"	3/4"	19,00 mm	
Tamices Norma	8"	1/2"	12,50 mm	
Tamices Norma	8"	3/8"	9,50 mm	
Tamices Norma	8"	4	4,75 mm	
Tamices Norma	8"	10	2,00 mm	Retenido
Tamices Norma	8"	40	0,425 mm	Agregado fino
Tamices Norma	8"	100	0,150 mm	
Tamices Norma	8"	200	0,075 mm	

Fuente: Norma ASTM

### COMBINACIÓN DE AGREGADOS

Son diferentes los métodos que se puedan emplear para la combinación de agregados, entre ellos está la dosificación de los agregados por peso y por métodos gráficos. El método gráfico no se describirá en esta parte del libro.

#### Dosificación de los agregados por peso

$$P = Aa + Bb + Cc \text{ etc}$$

Donde:

P: Porcentaje promedio de las especificaciones en un tamiz

A, B, C, etc.: Porcentaje de material que pasa un tamiz para la granulometría A, B, C, etc.

a, b, c, etc. :Proporción de agregados A, B, C, etc. usado en la combinación. La suma es

***Combinación de dos agregados***

$$P = Aa + Bb$$

Sabiendo que  $a+b=1$ ,  $a=1-b$ ; y reemplazando en la ecuación, se tiene:

$$b = \frac{P - A}{B - A} \text{ y } a = \frac{P - B}{A - B}$$

*Imagen A.1: Tamizado por la serie de tamices.*

*El tamizado se lo realizara en el roptap*



*Tabla A:3 Tabla de datos de la granulometría de los agregados*

<b>Peso Total (gr.)</b>	<b>15000</b>
-------------------------	--------------

<b>Tamices</b>	<b>tamaño</b>	<b>Peso Ret.</b>	<b>Ret. Acum</b>	<b>% Ret</b>	<b>% que pasa</b>
	<b>(mm)</b>				<b>del total</b>
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	<b>100.00</b>
3/4"	19.0	1099.00	1099.00	7.33	<b>92.67</b>
1/2"	12.5	3745.18	4844.18	32.32	<b>67.68</b>
3/8"	9.50	994.98	5839.16	38.95	<b>61.05</b>
N°4	4.75	3798.67	9637.83	64.30	<b>35.70</b>
N°8	2.36	1920.63	11558.46	77.11	<b>22.89</b>
N°16	1.18	1036.77	12595.23	84.02	<b>15.98</b>
N°30	0.60	675.07	13270.30	88.53	<b>11.47</b>
N°50	0.30	566.95	13837.25	92.31	<b>7.69</b>
N°100	0.15	403.97	14241.21	95.01	<b>4.99</b>
N°200	0.075	340.17	14581.38	97.27	<b>2.73</b>
BASE	-	408.50	14989.88	100.00	<b>0.00</b>
<b>SUMA</b>		<b>14989.9</b>			
<b>PÉRDIDAS</b>		<b>10.1</b>			
<b>MF =</b>		<b>6.38</b>			

### **A.1.2. PESO ESPECÍFICO Y ABSORCION DEL AGREGADO GRUESO Y FINO**

## **GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO Y GRUESO**

### **(DOCUMENTO REFERENCIAL: ASTM C127 Y C128)**

El agregado grueso para su uso en pavimentos debe estar limpio, es decir, libre de materiales extraños, polvo, etc., como se mencionó anteriormente. El cálculo del peso específico del agregado grueso.

#### **Objetivo**

Este método de ensayo cubre la determinación de la medida la densidad de una cantidad de partículas de agregado grueso, la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción del agregado grueso según la norma ASTM C127-12.

La muestra a ser evaluada se satura y pesa en su condición saturada superficialmente seca:

1. Aproximadamente 5 kg. De material retenidos en la malla N°4 (4.75 mm) se lava y seca hasta que alcance peso constante.
2. La muestra seca se sumerge por 24 horas en agua.
3. Los agregados se sacan del agua y secan superficialmente con ayuda de una toalla.
4. Se obtiene el peso de la muestra en su condición superficialmente seca.
5. La muestra saturada superficialmente seca se coloca en una cesta de alambre y se determina el peso de la muestra sumergido en agua.
6. La muestra se seca al horno hasta obtener peso constante.
7. La gravedad específica se calcula según:

Imagen A:2Muestra pesada en Seco



Imagen A: 3Muestra pesada en Seco



A: Muestra secada

B: Peso muestra satura con superficie seca

C: Peso saturada dentro del agua

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{A}{B - C}$$

$$\text{Peso específico saturado con superficie seca} = \frac{B}{B - C}$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{(A - C)}$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{(B - A)}{A} * 100$$

### PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO GRUESO (GRAVA)

MUESTRA N°	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm3)	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm3)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm3)	% DE ABSORCIÓN
1	4866.30	5046.55	3052.00	2.44	2.53	2.68	3.70
2	4855.30	4999.30	3049.00	2.49	2.56	2.69	2.97
3	4852.50	5044.54	3055.00	2.44	2.54	2.70	3.96
PROMEDIO				2.46	2.54	2.69	3.54

### A.1.2.3. PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO GRUESO (GRAVILLA)

**GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO Y  
FINO  
(DOCUMENTO REFERENCIAL: ASTM C127 Y C128)**

El agregado grueso para su uso en pavimentos debe estar limpio, es decir, libre de materiales extraños, polvo, etc., como se mencionó anteriormente.

### **Objetivo**

Este método de ensayo cubre la determinación de la medida la densidad de una cantidad de partículas de agregado grueso, la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción del agregado grueso según la norma ASTM C127-12.

Se realizó el ensayo con tres muestras, cada una de 5 Kg, se siguieron los pasos como se muestra a continuación:

### **Equipo y Materiales**

**Balanza:** es un instrumento que sirve para medir el peso de un objeto. Para el ensayo de granulometría se necesita una balanza cuya precisión sea de  $\pm 0.01$  gr para evitar errores de aproximación.

**Horno:** se debe utilizar un horno que pueda mantener una temperatura constante de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante 3 horas.

### **Procedimiento del ensayo**

a) Previo a la realización del ensayo, se debe lavar y secar el material para eliminar los residuos orgánicos, así como también remover el material fino adherido a las partículas de agregado grueso.

b) Tamizar el material lavado y secado por el tamiz #4, eliminando el pasante del mismo y pesando el retenido de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla A.4 Peso de la muestra en función del tamaño máximo nominal.

Tamaño Máximo Nominal de la muestra (pulg)	Peso mínimo de la muestra (kg)
$\frac{1}{2}$	2
$\frac{3}{4}$	3
1	4
$1 \frac{1}{2}$	5
2	8
$2 \frac{1}{2}$	12
3	18
$3 \frac{1}{2}$	25
4	40
$4 \frac{1}{2}$	50
5	75
6	125

Fuente: Norma ASTM C127-12

c) Una vez pesada la cantidad adecuada de material se debe saturar la muestra en agua durante 24 horas a temperatura ambiente.

d) Transcurrido el periodo de saturación se debe secar el material hasta eliminar el agua superficial visible, esto se hace con la ayuda de un paño absorbente. En caso de ser necesario se puede exponer la muestra a los rayos solares, siempre y cuando se controle que el material no pierda agua en exceso. A continuación se pesa el material saturado con superficie seca.

e) Luego colocar la muestra dentro de la balanza de inmersión para obtener el peso sumergido. Antes de retirar la muestra, tomamos la temperatura del agua para realizar la corrección de densidad correspondiente.

f) A continuación retirar la muestra y la introducimos al horno a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  hasta que la muestra se seque todo el material

g) Sacar la muestra del horno y dejar enfriar a temperatura ambiente durante 3 horas y se determina el peso seco.

*Imagen A.4: Pesaje del material retenido en el tamiz N° 4*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen A.5: Secado superficial de la muestra saturada 24 hrs antes.*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen A.6: Obtención del peso sumergido.*



*Fuente: Elaboración Propia*

A: Muestra secada

B: Peso muestra satura con superficie seca=5050.20gr

C: Peso saturada dentro del agua=3042gr

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{A}{B - C} = 2.46$$

$$\text{Peso específico saturado con superficie seca} = \frac{B}{B - C} = 2.51$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{(A - C)} = 2.61$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{(B - A)}{A} * 100$$

### **PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO GRUESO (GRAVILLA)**

MUESTRA Nº	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm3)	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm3)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm3)	% DE ABSORCIÓN
1	4932.50	5050.20	3042.00	2.46	2.51	2.61	2.39
2	4935.50	5048.55	3047.00	2.47	2.52	2.61	2.29
3	4933.44	5046.32	3046.00	2.47	2.52	2.61	2.29
PROM.				2.46	2.52	2.61	2.32

### **GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO**

**(DOCUMENTO REFERENCIAL: ASTM C127 Y C128)**

El cálculo del peso específico de la muestra seca de agregado establece un punto de referencia para medir los pesos específicos necesarios en la determinación de las proporciones agregadas, betun y vacíos que van a usarse en los métodos de diseño.

El peso específico es la relación que existe entre el peso de una sustancia cualquiera y su volumen a una temperatura cualquiera, también aplicable a sólidos como el caso de los agregados.

### **Objetivo**

Este método de ensayo cubre la determinación de la medida la densidad de una cantidad de partículas de agregado fino, la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción del agregado fino según ASTM C128-12.

### **Equipo y Materiales**

***Picnómetro:*** es una probeta que dispone de un cuello alargado y un bulbo inferior, permite determinar la densidad del agregado, en referencia a la de un fluido de densidad conocida, por ejemplo el agua.

***Agua destilada:*** El agua destilada es aquella cuya composición se basa en la unidad de moléculas de H<sub>2</sub>O. Es aquella a la que se le han eliminado las impurezas e iones mediante destilación. Se caracteriza por tener un ph neutro.

***Pipeta:*** Tubo de varias formas, cuyo orificio superior se tapa a fin de que la presión atmosférica impida la salida del líquido. La pipeta es un utensilio de laboratorio, que sirve para hacer mezclas y transportar líquidos en poca cantidad. Suelen ser de vidrio o de plástico y está formada por un tubo transparente por el cual se puede ver la cantidad de líquido que se está cogiendo.

**Procedimiento del ensayo:**

a) Previo a la realización del ensayo, se debe pesar una muestra de 500 gr, la cual debió haber sido lavado y secado.

*Imagen A.7: Lavado del material que pasa por el tamiz N°4*



*Imagen A.8: Muestra sumergida en agua por 24 hrs.*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen A.9: Secado superficial con secadora.*



*Fuente: Elaboración Propia*

- b)** Pesar el picnómetro vacío en una balanza de precisión de  $\pm 0.1$  gr.
- c)** Llenar el picnómetro con agua destilada hasta la marca de aforo y pesar la misma en una balanza de precisión.
- d)** Retirar el agua del picnómetro tratando que no quede residuos de la misma, seguido colocamos la muestra de agregado dentro del picnómetro con la ayuda de un embudo.

e) A continuación se vierte agua dentro del picnómetro hasta que esta cubra la tercera parte del mismo.

*Imagen A.10: Peso de la muestra más agua.*



*Imagen A.11: Peso de la muestra seca.*



- A: Peso muestra secada
- B: Volumen del matraz
- C: Peso del agua agregado al matraz
- D: Peso de la muestra

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{A}{B - C} =$$

$$\text{Peso específico saturado con superficie seca} = \frac{B}{B - C} =$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{(B - C) - (B - A)} =$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{(D - A)}{D} * 100 =$$

### A.1.3. DESGASTE DE LOS ÁNGELES

## ENSAYO DE ABRASIÓN POR MEDIO DE LA MAQUINA DE LOS ÁNGELES DOCUMENTO REFERENCIAL (ASTM C-131)

Los agregados deben ser capaces de resistir el desgaste irreversible y degradación durante la producción, colocación y compactación de las obras de pavimentación, y sobre todo durante la vida de servicio del pavimento.

Debido a las condiciones de esfuerzo deformación, la carga de la rueda es transmitida del pavimento a través de la llanta como una presión vertical aproximadamente uniforme y alta. La estructura del pavimento distribuye los esfuerzos de la carga, de una máxima intensidad en la superficie hasta una mínima en la subrasante.

Por esta razón los agregados que están en, o cerca de la superficie, como son los materiales de base y carpeta asfáltica, deben ser los más resistentes que los agregados usados en capas inferiores, como la sub base, de la estructura del pavimento, la razón se debe a que las capas superficiales reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por parte de las cargas del tránsito.

Por otro lado, los agregados transmiten los esfuerzos a través de los puntos de contacto donde actúan presiones altas. El ensayo de desgaste de los ángeles, ASTM C-131 (para agregados menores de 1 ½”), mide básicamente la resistencia de los puntos de contacto de un agregado al desgaste y/o abrasión.

Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje de desgaste de los agregados de tamaños menores a 37.5 mm (1 ½”), por medio de la máquina de los ángeles.

### **Objetivo**

Medir el desgaste producido por una combinación de impacto y rozamiento superficial en una muestra de agregado grueso según la norma ASTM C131-89.

### **Equipo y Materiales**

**Balanza:** es un instrumento que sirve para medir el peso de un objeto. Para el ensayo de abrasión se necesita una balanza cuya precisión sea de  $\pm 0.1$  gr ya que los pesos son elevados.

**Tamiz:** un tamiz es simplemente una malla de filamentos metálicos entrecruzados, el cual se lo utiliza para separar las partes gruesas de las finas. Para este ensayo se necesita tamices de 1",  $\frac{3}{4}$ ",  $\frac{1}{2}$ ",  $\frac{3}{8}$ ", #4 y #12.

**Bandejas y taras:** elementos auxiliares del laboratorio para colocación del material.

**Horno:** se debe utilizar un horno que pueda mantener una temperatura constante de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  durante 3 horas.

**Máquina de los Ángeles:** es un cilindro metálico conectado a un motoreléctrico, el cual contiene unas aletas metálicas en su interior, las cuales se encargan de triturar el material mediante un proceso de rotación.

**Esferas:** un juego de esferas de acero de 45 a 50 mm de diámetro y con una masa de  $440 \pm 50$  gr cada una. La cantidad de esferas viene dada por la siguiente tabla:

Tabla A.5 Selección de esferas y peso de carga según granulometría.

Graduación	Numero de Esferas	Peso de la carga (gr)
<b>A</b>	12	5000 +-25
<b>B</b>	11	4584 +-25
<b>C</b>	8	3330 +-20
<b>D</b>	6	2500 +-15

Fuente: norma ASTM C131-89

**Procedimiento de ensayo:**

a) Previo a la realización del ensayo, se debe lavar y secar el material para eliminar los residuos orgánicos, así como también remover el material fino adherido a las partículas de agregado grueso.

b) Tamizar el material lavado y secado por los siguientes tamices 1 ½, 1, ¾, ½, 3/8, ¼, #4 y #8 pulgadas. Con esto se puede clasificar al agregado de acuerdo con la siguiente tabla:

La muestra llegada al laboratorio deberá ser identificada. Para muestras cuyo tamaño máximo sea menor a 1 ½" o mayor a ¾" es el mismo.

El material deberá ser lavado y secado en horno a temperatura constante de 105-110°C, y el tamizado según las mallas que se indican. Mezclar las cantidades que el método indique según la tabla anterior.

Pesar la muestra precisión de 1 gr. y 5 gr. Para tamaños máximos de 1 ½” y ¾” respectivamente.

Introducir la muestra de ensayo junto con la carga abrasiva en la máquina de los ángeles, cerrar la tapa del cilindro.

Activar la máquina, regulándose el número de revoluciones indicado por el método. Finalizado el tiempo de rotación, se retiran las cargas y el material. Se tamiza por la malla N° 12.

El material retenido en el tamiz N°12 se lava y seca en horno, a una temperatura constante entre 105° a 110°C. pesar la muestra seca.

*Imagen A.12: Colocado de la muestra en la máquina de los ángeles con el N° de esferas correspondiente.*



*Imagen A.13: Muestra después del ensayo en la máquina de los ángeles.*



*Imagen A.14: Pesaje de la muestra retenida en el tamiz N°12, después del lavado y secado en el horno.*



*Fuente: Elaboración Propia*

$$\% \text{ desgaste} = \frac{P_{\text{inicial}} - P_{\text{final}}}{P_{\text{final}}} * 100 = 27.65$$

*Tabla A.6: Tabla de pesos del agregado grueso y N° de esferas para el Desgaste de los Ángeles.*

GRADACIÓN		A	B	C	D
DIAMETRO		CANTIDAD DE MATERIAL AEMPLEAR (gr)			
PASA	RETENIDO				
1 1/2"	1"	1250±25			
1"	3/4"	1250±25			
3/4"	1/2"	1250±10	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±10	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	N°4			2500±10	
N°4	N°8				5000±10
PESO TOTAL		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
NUMERO DE ESFERAS		12	11	8	6
N°DE REVOLUCIONES		500	500	500	500
TIEMPO DE ROTACION		30	15	15	15

*Fuente: Norma ASTM, C131.*

MATERIAL	PESO INICIAL	PESO FINAL	% DE DESGASTE	ESPECIFICACION ASTM
A	3762.90	2722.5	27.65	35% MAX
B	-	-	-	35% MAX
C	-	-	-	35% MAX
D	-	-	-	35% MAX

#### **A.1.4. EQUIVALENTE DE ARENA**

##### **EQUIVALENTE DE ARENAS Y AGREGADOS FINOS**

### **(DOCUMENTO REFERENCIAL ASTM D 2419)**

Este método de ensayo asigna un valor empírico a la cantidad relativa, finura y características del material fino presente en una muestra de ensayo formado por suelo granular que pasa el tamiz N°4 (4.75 mm). El término “Equivalente de Arena” transmite el concepto que la mayoría de los suelos granulares y agregados finos son mezcla de partículas gruesas, arenas y generalmente finos.

Para determinar el porcentaje de finos en una muestra, se incorpora una medida de suelo y solución en una probeta plástica graduada que luego de ser agitada separa el recubrimiento de finos de las partículas de arena; después de un período de tiempo, se pueden leer las alturas de arcilla y arena en la probeta. El equivalente de arena es la relación de la altura de arena respecto a la altura de arcilla, expresada en porcentaje.

Este método proporciona una manera rápida de campo para determinar cambios en la calidad de agregados durante la producción o colocación.

#### **EQUIPOS DE LABORATORIO**

1. *Tubo irrigador.* De acero inoxidable, cobre o bronce, de 6.35 mm de diámetro exterior, 508 mm de longitud, cuyo extremo inferior está cerrado en forma de cuña. Tiene dos agujeros laterales de 1 mm de diámetro en los dos planos de la cuña cerca de la punta.

2. *Sistema de Sifón.* Se compone de un botellón de 1 galón (3.8 lt) de capacidad con un tapón. El tapón tiene dos orificios que lo atraviesan, uno para el tubo del sifón y el otro para entrada de aire. El conjunto deberá ubicarse a 90 cm por encima de la mesa.

3. *Probeta graduada.* Con diámetro interior de  $31.75 \pm 0.381$  mm y 431.8 mm de altura graduada hasta una altura de 381 mm, provista de un tapón de caucho o goma que ajuste en la boca del cilindro.

4. *Tubo flexible*. De caucho o goma con 4.7 mm de diámetro, tiene una pinza que permite cortar el paso del líquido a través del mismo. Este tubo conecta el tubo irrigador con el sifón.

5. *Pisón de metal*. Consistente en una barra metálica de 457 mm de longitud que tiene enroscado en su extremo inferior un disco metálico de cara inferior plana perpendicular al eje de la barra y cara superior de forma cónica. El disco lleva tres tornillos pequeños que sirven para centrarlo dentro del cilindro. Lleva una sobrecarga en forma cilíndrica, de tal manera que el conjunto pese 1 kg. (Barra metálica, disco y sobrecarga).

6. *Recipiente metálico*. De estaño aproximadamente de 57 mm de diámetro con capacidad de  $85 \pm 5$  ml, borde superior uniforme de modo que la muestra que se coloca en ella se pueda enrasar para conseguir el volumen requerido.

7. *Cronómetro o reloj*. Lecturas en minutos y segundos

8. *Embudo*. De boca ancha para incorporar la muestra de ensayo en la probeta graduada.

9. *Tamiz N°4*.

10. *Recipiente para mezcla*

11. *Horno*. Capaz de mantener temperaturas de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ .

12. *Papel filtro*. Watman N°2V o equivalente

### **Procedimiento de ensayo:**

1. Reactivos, materiales y preparación de la Solución Madre

Reactivos y materiales

Cloruro de calcio anhidro, 454 gr.

Glicerina USP, 2050 gr (1640 ml)

## Preparación

Disolver 454 gr. cloruro de calcio anhidro en 0.5 gal (1.9 lt) de agua destilada. Se deja enfriar a temperatura ambiente y se pasa por papel de filtro. A la solución filtrada se le incorpora los 2050 gr de glicerina y 47 gr. de formaldehído mezclar bien.

### 2. Reactivos, materiales y preparación de la Solución de Trabajo

Reactivos y materiales

Solución madre

Agua destilada

Preparación

Diluir  $85 \pm 5$  ml al ras de la solución madre en 1 gal (3.8 lt) de agua destilada.

### 3. Preparación de la muestra

a. Separar aproximadamente 1500 gr de material que pase el tamiz N° 4 (4.75 mm)

Tener el cuidado de desmenuzar todos los terrones de material fino y limpiar cualquier cubierta de fino que se adhiere al agregado grueso, estos finos pueden ser removidos por secado superficial del agregado grueso y frotación entre las manos sobre un recipiente plano. Añádase este material a la porción fina de la muestra.

b. Para determinar la cantidad del material para el cuarteo

- Si fuera necesario humedecer el material, para evitar segregación o pérdida de finos durante el cuarteo. Tener cuidado al adicionar agua a la muestra, para mantener una condición de flujo libre de material.

- Usando el recipiente metálico de  $85 \pm 5$  ml de capacidad, saque cuatro medidas de muestra. Cada vez que se llene una medida golpear ligeramente, la parte inferior del recipiente sobre una superficie dura por lo menos cuatro veces.

- Registre la cantidad de material contenido en las cuatro medidas, ya sea por peso o volumen, de la probeta de plástico.
- Regrese el material a la muestra y proceda a separarla por cuarteo. Obtener la cantidad suficiente de muestra para llenar la medida.
- Secar el espécimen de ensayo a peso constante de  $105\pm 5^{\circ}\text{C}$  y dejarlo enfriar a temperatura ambiente antes del ensayo.

c. Manteniendo la condición de flujo libre, humedecer lo suficiente el material para evitar segregación o pérdida de finos durante el cuarteo.

d. Separar por cuarteo entre 1000 y 1500 gr de material. Colóquelo en un recipiente y mezcle en forma circular hacia el centro, por un minuto, hasta obtener una mezcla uniforme.

e. Verificar las condiciones de humedad del material apretando con la mano una porción de material, si se forma una masilla que permite abrir la mano sin romperse, la mezcla tiene el rango correcto de humedad.

- Si la muestra está muy seca se desmoronará, debiendo adicionar agua; volver a mezclar y probar si se formó la masilla plástica.
- Si la muestra está muy húmeda deberá secarse al aire, mezclándola frecuentemente para asegurar uniformidad y ensayándola nuevamente.

6. Si la humedad inicial se encuentra dentro de los límites arriba descritos, la muestra se puede ensayar inmediatamente. Si la humedad es diferente a los límites indicados, la muestra deberá ponerse en una vasija, cubriéndola con una toalla húmeda que no toque el material, por espacio de 15 min. como mínimo.

7. Después de transcurrido el tiempo mínimo, remezclar por 1 min. sin agua, formando un cono con el material, utilizando una paleta.

8. Tome el recipiente metálico en una mano y presiónese contra la base del cono mientras se sostiene a éste con la mano libre.
9. A medida que el recipiente atraviesa el cono manténgase suficiente presión en la mano para que el material lo llene por completo. Presiónese firmemente con la palma de la mano compactando el material hasta que éste se consolide, el exceso debe ser retirado y desechado, enrasando con la paleta a nivel del borde del recipiente.

#### **4. Preparación de Aparatos**

1. Ajustar el sifón a un botellón de 1.0 gal (3.8 lt) conteniendo la solución de trabajo de cloruro de calcio. Colocarlo en un anaquel ubicado a  $91 \pm 3$  cm sobre la mesa de trabajo.
2. Soplar el sifón dentro del botellón con solución, por el tubo de purga y con la abrazadera abierta.

#### **5. Procedimiento**

1. Por el sifón verter  $102 \pm 3$  mm.de solución de trabajo de cloruro de calcio, en la probeta.
2. Con ayuda del embudo verter en la probeta,  $85 \pm 5$  cm<sup>3</sup> del suelo preparado.
3. Golpear la parte baja del cilindro varias veces con la palma de la mano para desalojar las posibles burbujas de aire y para humedecer completamente la muestra. Dejar reposar durante  $10 \pm 1$  min.
4. Transcurridos los 10 min., tapar la probeta con un tapón; suelte el material del fondo invirtiendo parcialmente el cilindro y agitándolo a la vez. El material puede ser agitado con cualquiera de los siguientes métodos:

##### **4.1 Método manual**

- Sujetar la probeta en posición horizontal y sacudirla vigorosamente de izquierda a derecha.
- Agitar el cilindro 90 ciclos en 30 segundos, usando un recorrido de  $23\pm 3$  cm. Un ciclo se define como el movimiento completo a la derecha seguido por otro a la izquierda. El operador deberá mover solamente los antebrazos manteniendo el cuerpo y hombros relajados.
- Concluida con la operación de agitación, colocar la probeta verticalmente sobre la mesa de trabajo y quitar el tapón.

### **5. Proceso de irrigación.**

- El cilindro no deberá moverse de su posición vertical y con la base en contacto con la superficie de trabajo.
- Introduzca el tubo irrigador en la parte superior de la probeta, suelte la abrazadera de la manguera y limpie el material de las paredes de la probeta mientras el irrigador baja.

El irrigador debe llegar hasta el fondo, aplicando suavemente una presión y giro mientras que la solución de trabajo fluye por la boca del irrigador, esto impulsa el material fino desde el fondo hacia arriba poniéndolo sobre las partículas gruesas de arena.

- Cuando el nivel del líquido alcance la señal de los 38 cm, levante el tubo irrigador despacio sin que deje de fluir la solución, de tal manera que el nivel se mantenga cerca de 38 cm mientras se saca el tubo. Regule el flujo justo antes que el tubo esté completamente fuera y ajuste el nivel final a los 38 cm.

### **6. Lectura de arcilla.**

- Dejar reposar durante 20 min.  $\pm$  15 s. Comience a medir el tiempo luego de retirar el tubo irrigador.
- Al término de los 20 min., leer el nivel superior de la suspensión de arcilla. Este valor se denomina *lectura de arcilla*. Si la línea de marca no es clara transcurridos los 20 min. Del período de sedimentación, permita que la muestra repose sin ser perturbada hasta que una lectura de arcilla pueda ser claramente obtenida; inmediatamente, lea y anote el nivel máximo de la suspensión arcillosa y el tiempo total de sedimentación. Si el período total de sedimentación excede los 30 min., efectúe nuevamente el ensayo, usando tres especímenes individuales de la misma muestra. Registre la lectura de la columna de arcilla para la muestra que requiere el menor tiempo de sedimentación como *lectura de arcilla*.

#### **7. Lectura de arena.**

Después de la lectura de arcilla, introduzca en la probeta el ensamblaje del pie (conjunto del disco, varilla y sobrepeso) y baje lentamente hasta que llegue sobre la arena. No permitir que el indicador golpee la boca de la probeta mientras se baja el conjunto.

- Cuando el conjunto toque la arena con uno de los tornillos de ensamblaje hacia la línea de graduación de la probeta, lea y anote. Restar 25.4 cm. del nivel indicado en el borde superior del indicador y registrar este valor como la *lectura de arena*.

8. Después de tomar la lectura de arena, tenga cuidado de no presionar con el pie porque podría dar lecturas erróneas.

9. Si las lecturas de arcilla y arena están entre 2.5 mm de graduación (0.1”), registrar el nivel de graduación inmediatamente superior como lectura.

*Imagen A.15: Material que pasa el tamiz n°4*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen A.16: Pesaje de la muestra sin lavar y vertido de la solución.*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen A.17: Obtención de las lecturas  $H_1$  y  $H_2$*



*Tabla A.7: Tabla de resultados de Equivalente de Arena*

N° de Muestra	H1	H2	Equivalente de Arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	9.8	10.68	91.76
2	10.3	12.17	84.63
3	11.4	11.82	96.45

Promedio	90.95
----------	-------

Equivalente de Arena (%)	NORMA
90.95	> 50%

## ANEXO 2

### A.2. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL BETUN

#### A.2.1. PENETRACIÓN

#### ENSAYO DE PENETRACIÓN DE MATERIALES BITUMINOSOS.

**(DESIGNACIÓN AASHTO: T 49-93)**

**(DESIGNACIÓN ASTM: D 5-86)**

**ALCANCE**

Este método de ensayo cubre la determinación de la penetración de materiales bituminosos semi-sólido y sólidos. Los materiales que tienen penetraciones debajo de 350 pueden ser probados por el aparato normal y con el siguiente procedimiento. Para materiales que tienen penetraciones entre 350 y 500, se debe usar un aparato especial.

**DESCRIPCIÓN DE TÉRMINO**

La penetración de un material bituminoso es la distancia en décimas de milímetro que una aguja normalizada penetra verticalmente bajo las condiciones fijas de temperatura, carga y tiempo.

**RESUMEN DEL MÉTODO**

La muestra se funde y se refresca bajo las condiciones controladas. La penetración es medida con un penetrómetro por medio de una aguja normalizada se aplica a la muestra bajo las condiciones específicas.

**SIGNIFICADO Y UTILIZACIÓN**

La prueba de penetración se usa como una medida de consistencia. Los valores más altos de penetración indican consistencia más suave.

**HERRAMIENTAS**

**Aparato De Penetración**

Cualquier aparato que permita movimiento del soporte sin fricción apreciable y que se calibre con precisión para rendir resultados que de acuerdo con la descripción del término, la penetración será aceptable. La superficie en la cual el recipiente de muestra descansa, debe ser plano y el eje del soporte debe estar en aproximadamente

90 grados a esta superficie. El soporte será desmontable sin el uso de herramientas especiales, para verificar su masa. Cuando la aguja está montada en un herrete, la masa del soporte movable debe ser de  $47.5 \pm 0.05$  g. Sin tener en cuenta el tipo de montura de la aguja, la masa total de la aguja y del soporte ensamblado debe ser de  $50.0 \pm 0.05$  g. Los pesos de  $50.0 \pm 0.05$  g y  $100.0 \pm 0.05$  g deben ser proporcionados para las cargas totales de 100 g y 200 g, dependiendo de las condiciones del ensayo a ser aplicado.

### **Aguja**

La aguja debe estar hecha de acero inoxidable totalmente endurecido y templado, 440 °C o equivalente, HRC 54 a 60. Será aproximadamente 50 mm (2 in.) de longitud y 1.00 a 1.02 mm (0.039 a 0.040 in.) de diámetro. Debe adelgazar simétricamente en un extremo en forma de cono cuyo ángulo debe estar dentro del rango de 8.7 a 9.7 grados encima de la longitud entera del diámetro de la aguja llena, y cuyo eje debe ser coincidente con el eje de la aguja dentro de 0.0127 mm (0.0005 in.) como máximo del indicador total. Después del adelgazado, el punto debe ser de 0.14 a 0.16 mm (0.0055 a 0.0063 in.) en diámetro. El truncamiento será cuadrado con el eje de la aguja dentro de 2 grados y el borde será afilado.

*Imagen A.18: Aguja de Penetración*

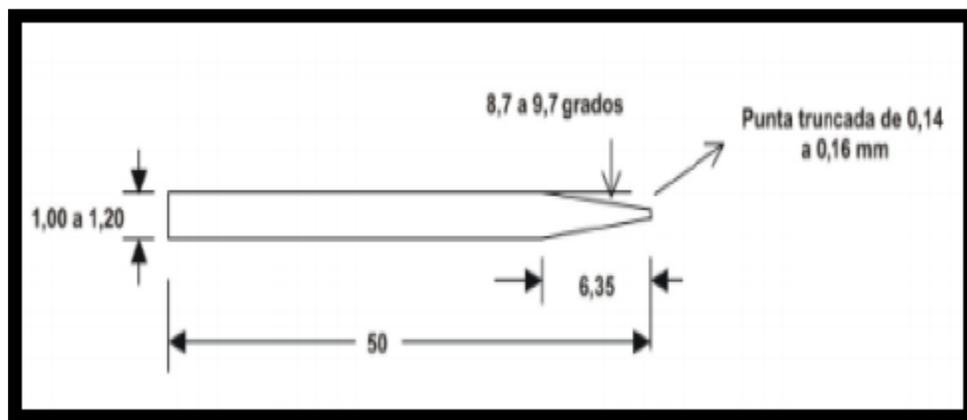


Figura 18: Detalle aguja de Penetración. Fuente: ASTM D 5-97

### Recipiente

Los recipientes, en los cuales las muestras serán ensayadas, pueden ser de metal o de vidrio con forma cilíndrica y con el fondo plano. Los recipientes a ser usados para materiales de penetración de 200 o menos debe tener una capacidad nominal de 3 oz (90 ml), de 55 mm (2.17 in.) de diámetro y 35 mm (1.38 in.) de altura. Los recipientes a ser usados para materiales de penetración mayores a 200 debe tener una capacidad nominal de 6 oz (175 ml), de 70 mm de diámetro y 45 mm (1.77 in.) de altura.

### Baño De Agua

El baño de agua debe mantener una temperatura que no varía más de 0.1°C de la temperatura del ensayo. El volumen de agua no debe ser menos de 10 litros. El baño tendrá un estante perforado apoyado en una posición no menos de 50 mm del fondo del baño y no menos de 100 mm debajo del nivel líquido. El agua en el baño debe ser substancialmente libre del aceite y limo u otro crecimiento orgánico. Se puede usar agua con sal en el baño de agua para las determinaciones a temperaturas bajas. Si los ensayos de penetración serán hechas sin quitar la muestra del baño, se debe proporcionar un estante suficientemente fuerte para apoyar el aparato de penetración.

## **PREPARACIÓN DE LA MUESTRA**

Caliente la muestra con cuidado para prevenir sobrecalentamiento local hasta que se haya puesto fluido. Entonces mezclar de forma constante y aumente la temperatura de la muestra del asfalto a no más de 100°C (180°F) sobre su punto de ablandamiento esperado determinado de acuerdo con el Método del Ensayo para el Punto de Ablandamiento de Materiales Bituminosos (Método del Anillo y la Bola – AASHTO T 53). Evite la inclusión de burbujas de aire. Para alcanzar la temperatura de vertido, no caliente la muestra ablandada más de 30 minutos. Entonces verter en el recipiente de la muestra a una profundidad tal que, cuando se enfríe a la temperatura del ensayo, la profundidad de la muestra es por lo menos 10 mm mayor que la profundidad a la que se espera que la aguja penetre. Verter las muestras separadas para cada variación en condiciones del ensayo.

Cubra cada recipiente y sus contenidos como una protección contra el polvo, de manera que permita enfriar en una atmósfera a una temperatura no mayor que 30°C (86°F) y no menor que 20°C (68°F) por no menos de 1½ horas ni más de 2 horas cuando la muestra está en un recipiente de 175 ml (6 oz) y por no menos de 1 ni más de 1½ horas cuando la muestra está en un recipiente del 90 ml (3 oz). Entonces ponga la muestra en el baño de agua mantenido la temperatura prescrita de ensayo, junto con el plato del traslado si es que se usó, y dejelá por no menos de 1½ horas ni más de 2 horas cuando la muestra está en el recipiente del 175 ml (6 oz), y por no menos de 1 ni más de 1½ horas cuando la muestra está en un recipiente del 90 ml (3 oz).

## **PROCEDIMIENTO**

Se examinara el soporte de la aguja para establecer la ausencia de agua y otra materia extraña. Limpie una aguja de penetración con gasolina u otro solvente conveniente, seque con una tela limpia e inserte la aguja en el penetrómetro. A menos que por otra parte se especifique, ponga el 50 gramos de peso sobre la aguja, haciendo la carga total de  $100 \text{ g} \pm 0.1 \text{ g}$  para la aguja y atadura. Si se hacen ensayos con el aparato de penetración montado en el baño, ponga el recipiente de la muestra directamente en la posición sumergida del aparato de penetración. Si se hacen

ensayos con la muestra en el baño y el aparato de penetración fuera del baño, ponga los recipientes en el estante proporcionado en el baño. En los procedimientos anteriores, el recipiente debe mantenerse sumergido completamente durante las pruebas completas. Si se hacen ensayos usando el plato del traslado con el aparato de penetración fuera del baño, ponga la muestra en el plato lleno de agua del baño a una profundidad tal que cubra completamente el recipiente de la muestra. Entonces ponga el plato del traslado que contiene la muestra en el estante en el aparato de penetración y penetre inmediatamente. En cada caso, ajuste la aguja cargada con el peso especificado para hacer simplemente contacto con la superficie de la muestra. Logre esto haciendo contacto del punto de la aguja real con su imagen reflejada por la superficie de la muestra de una fuente de luz propiamente puesta. Anote la lectura del dial o ponga el indicador en cero. Entonces rápidamente se suelta la aguja por el periodo especificado de tiempo y se ajusta el instrumento para medir la distancia penetrada. Observe el recipiente de la muestra como la aguja se aplica, y si cualquier movimiento del recipiente es notado, ignore el resultado.

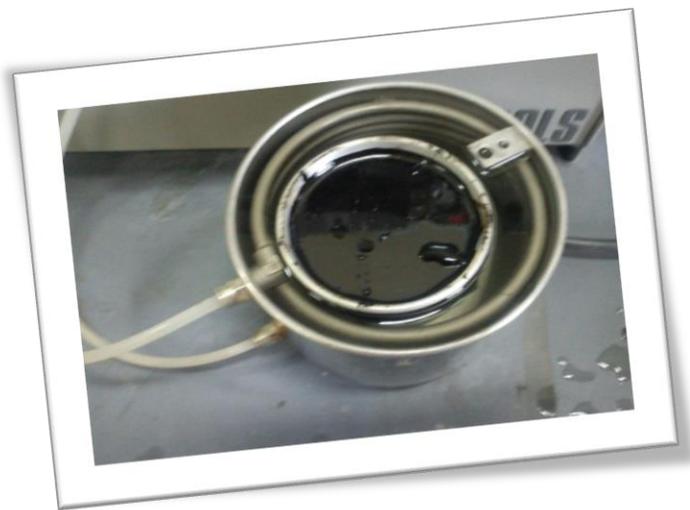
Haga por lo menos tres penetraciones a los puntos en la superficie de la muestra a no menos de 10 mm (3/8 in.) del lado del recipiente y no menos de 10 mm (3/8 in.) de separación. Si el plato del traslado se usa, devuelve el plato y muestra al baño de agua después de cada penetración. Antes de cada ensayo, limpie la aguja con una tela limpia humedecida con gasolina u otro solvente conveniente para quitar todo el betún adherido, y entonces limpie una tela seca limpia.

*Imagen A.19: Colocado del betún en taras*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen A.20: Muestras en baño María de 25°C.*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen A.21: Realización del ensayo de penetración.*



*Imagen A.22: Lectura del ensayo de penetración.*



*Fuente: Elaboración Propia*

## **A.2.2. VISCOSIDAD**

Este método cubre los procedimientos empíricos para determinar la viscosidad cinemática de productos de petróleo a temperaturas especificadas de 135°C. Un procedimiento especial para los productos cerosos es incluido.

#### PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:

*Imagen A.23: Calentado del aceite y colocado del viscosímetro con el material bituminoso.*



#### **A.2.3.DUCTILIDAD**

## **DUCTILIDAD DE MATERIALES BITUMINOSOS.**

**(DESIGNACIÓN AASHTO: T 51-93)**

**(DESIGNACIÓN ASTM: D 113-79)**

### **ALCANCE**

La ductilidad de un material bituminoso es medida por la distancia en centímetros a la cual se alargará antes de romper cuando se tiran dos extremos de un espécimen de la briqueta del material, estos extremos son separados a una velocidad especificada y a una temperatura especificada. A menos que por otra parte se especifique, el ensayo se hará a una temperatura de  $25 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$  ( $77 \pm 0.2^{\circ}\text{F}$ ) y con una velocidad de 50 mm por minuto  $\pm 2.5$  mm por minuto. A otras temperaturas la velocidad debe especificarse.

### **SIGNIFICADO Y UTILIZACIÓN**

Este método de ensayo proporciona una medida de propiedades tensores de materiales bituminosos y puede usarse para medir ductilidad para los requisitos de la especificación.

### **HERRAMIENTAS**

#### **Moldes**

El molde será similar en diseño al mostrado en Figura. El molde se hará de latón, los extremos b y b' siendo conocidos como grapas y las partes a y a' como lados del molde. Las dimensiones del molde armado serán como está mostrado en Figura con las variaciones permisibles indicadas.

#### **Plato Base**

El plato base se hará de material no absorbente, de espesor suficiente para prevenir deformación, y de un tamaño suficiente para sostener de un a tres moldes. El plato será plano para que el fondo aparezca de cada molde sea tocado a lo largo del plato.

**Baño de agua**

El baño de agua se debe mantener a la temperatura de la prueba especificada, pudiendo variar no más de  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0.2^{\circ}\text{F}$ ) de esta temperatura. El volumen de agua debe ser no menos de 10 litros. La profundidad de agua debe ser no menos de 50 mm y tal que el molde puede ser inmerso a una profundidad de 25 mm. El agua en el baño debe ser sustancialmente libre del aceite y limo u otro crecimiento orgánico.

**Termómetro**

Para los ensayos a  $25^{\circ}\text{C}$  ( $77^{\circ}\text{F}$ ) use el Termómetro de Viscosidad Saybolt ASTM No. 17 C ( $17^{\circ}\text{F}$ ) para medir la temperatura del baño de agua y la temperatura del agua en la máquina del ensayo. Para las pruebas a otras temperaturas, use termómetros ASTM de un rango apropiado y una exactitud igual a eso de los No. 17. Ya que la exactitud de los resultados del ensayo es dependiente de las condiciones estrechamente controladas de temperatura, los termómetros deben ser calibrados por el Método para la Comprobación y Calibración de Termómetro del Líquido en Vidrio (Designación ASTM: E 77).

**Máquina de Ensayo**

Se colocara en el ductilímetro la briqueta de material bituminoso, en el cual el espécimen se sumerja continuamente en agua mientras las dos grapas se tiran separadamente a una velocidad uniforme, como especificó, sin vibración indebida.

**Calentador**

Un horno o plato caliente, calentador por electricidad o gas, puede usarse para fundir el material bituminoso.

**Recipiente**

Cualquier recipiente conveniente puede usarse para sostener el material bituminoso mientras este es fundido.

### **Contemporizador**

Cualquier instrumento conveniente, como un cuchillo de masilla o espátula, puede usarse con tal de que el borde cortante es recto y por lo menos 38 mm (1½ in.) ancho.

## **PROCEDIMIENTO**

### **Preparación del Aparato**

Arme el molde en el plato bajo, y para prevenir que el material de ensayo se pegue, cubra la superficie del plato y las superficies interiores de lados con un agente conveniente.

### **Especímenes del Ensayo Amoldando**

Caliente la muestra con cuidado para prevenir sobrecalentamiento local hasta que se haya puesto suficientemente fluido para verter. Después del revolver completo, teniendo cuidado de que no entre en ninguna burbuja de aire, vierta el material bituminoso en el molde. Vierta el material en un delgado chorro de un lado a otro, de principio a fin hasta que el material cubra hasta el nivel lleno del molde.

Llenando el molde, tenga cuidado para no descolocar las partes del molde que puedan torcer la briqueta. Permita que el molde y los volúmenes se enfríen para un periodo de 30 a 40 minutos y entonces poner el plato base y el molde lleno en el baño de agua, mantenidos a la temperatura de la prueba especificada por 30 minutos. Quite el plato base y el molde lleno del baño de agua, y con un contemporizador caliente corte el exceso el material bituminoso para que el molde simplemente esté lleno a nivel. Tenga cuidado que durante el cortado, el espécimen no se aparte del plato base o de los pedazos laterales del molde.

### **Especímen Guardado a Temperatura Estándar**

Coloque el plato base y molde, con espécimen de la briqueta, en el baño de agua o la máquina de ensayo y mantenga la temperatura especificada por un periodo de 85 a 95 minutos. Entonces quite la briqueta del plato, despegue los pedazos laterales, y inmediatamente pruebe la briqueta.

### **Pruebas**

En principio de la prueba, el agua en el tanque de la máquina de ensayo debe cubrir el espécimen ambos sobre y debajo de a través de 25 mm. Pegue las grapas a los alfileres o ganchos de la máquina de ensayo y tire las grapas aparte a la proporción de la especificada de velocidad hasta que la briqueta se rompa o el límite de viaje de la máquina sea alcanzado. Si necesario, use de un soluto que no interfiere con el ensayo, ajuste la gravedad específica del líquido en la máquina de ensayo para que el material bituminoso ni no venga a la superficie ni toque el fondo del baño en ningún momento durante el ensayo. Medida y graba la distancia a través de la cual las grapas se han tiradas para producir la ruptura, o graba el hecho si el espécimen no se rompiera dentro de la capacidad de la máquina.

### **REPORTE**

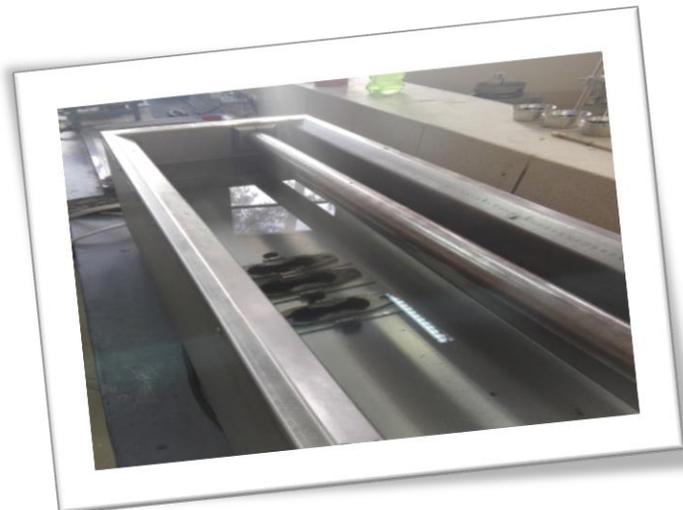
Un ensayo normal es uno en cual el material entre las dos grapas es tirando a un punto o hilo hasta que la ruptura ocurre al punto donde el hilo no tiene prácticamente ninguna área transversal o hasta que la capacidad de la máquina sea alcanzada. Si el material entra contacto con la superficie del agua o el fondo del baño, el ensayo no debe ser considerado normal.

Informe el promedio de los tres ensayos normales como la ductilidad de la muestra. Si un ensayo normal no se obtiene en tres pruebas sucesivas, informe la ductilidad como ser inasequible bajo las condiciones del ensayo.

*Imagen A.24: Colocado de la muestra en moldes previamente encerados.*



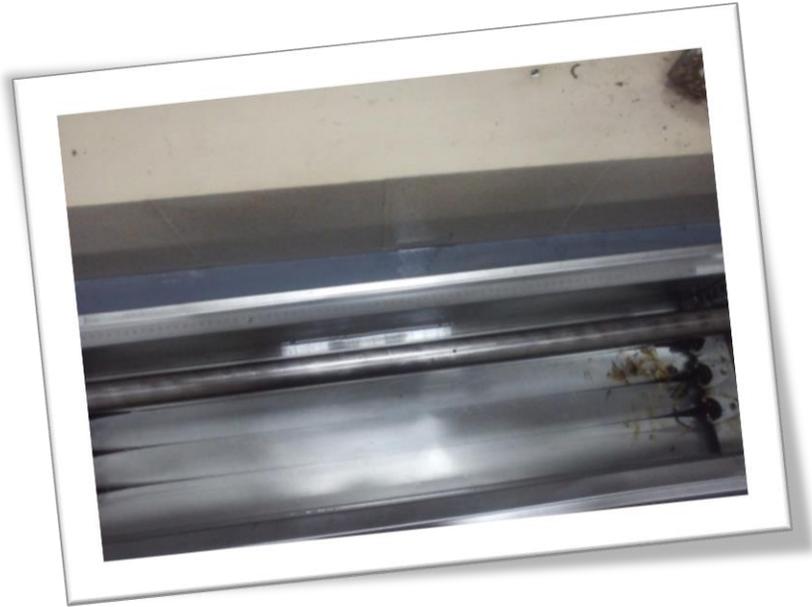
*Imagen A.25: Colocado de la muestra en moldes ductilímetro a 25°C*



*Imagen A.26: Colocado de las muestras al ductilímetro*



*Imagen A.27:*



*Fuente: Elaboración Propia*

#### **A.2.4. PUNTO DE INFLAMACIÓN**

## **PUNTO DE INFLAMACIÓN POR EL VASO ABIERTO DE CLEVELAND.**

### **DOCUMENTO REFERENCIAL (ASTM D1310-01 AASHTO T7996)**

#### **ALCANCE**

Este método cubre la determinación del punto de inflamación, por el Ensayo del Vaso Abierto de Cleveland, de productos de petróleo y otros líquidos, excepto los aceites de combustible y esos materiales que tienen un punto de inflamación de vaso abierto debajo de 79°C (175°F).

#### **DEFINICIONES**

##### **Punto de destello**

Es la temperatura más baja corregida a una presión barométrica de 101.3 kPa, a la aplicación del fuego (llama) causa el vapor de un espécimen para encender bajo las condiciones especificadas del ensayo.

##### **Punto de inflamación**

Es la temperatura más baja a la que un espécimen se mantendrá quemándose durante 5 segundos.

#### **RESUMEN DEL MÉTODO**

El vaso del ensayo se llena hasta un nivel especificado con la muestra. La temperatura de la muestra es aumentada rápidamente al principio y entonces a una proporción lenta constante a medida que el punto de destello se aproxima. En intervalos especificados una llama pequeña se pasa por el vaso.

La temperatura más baja a que la aplicación de la llama causa vapores sobre la superficie del líquido es denominada como el punto de destello. Para determinar el punto de inflamación, se continua con el ensayo hasta que la aplicación de la llama ocasiona que el aceite se incendie y se queme durante por lo menos 5 segundos.

Es la temperatura más baja corregida a una presión barométrica de 101.3 kPa, a la aplicación del fuego (llama) causa el vapor de un espécimen para encender bajo las condiciones especificadas del ensayo.

### **SIGNIFICADO Y UTILIZACIÓN**

El punto de destello mide la tendencia de la muestra a formar una mezcla inflamable con aire bajo condiciones del laboratorio controlado.

El punto de destello se usa en regulaciones de seguridad para definir materiales inflamables y combustibles. Uno debe consultar la regulación particular involucrada para las definiciones precisas de estas clases.

El punto de destello puede indicar la posible presencia de materiales altamente volátiles y inflamables con relación a material no inflamable o no volátil.

El punto de inflamación mide las características de la muestra para aguantar combustión.

### **HERRAMIENTAS**

#### **Aparato Del Vaso Abierto De Cleveland**

Este aparato consiste en el vaso del ensayo, plato calentador, aplicador de llama, calentador

#### **Termómetro**

Un termómetro que tenga un rango de -6 a 400°C.

### **PRUEBAS**

Erróneamente pueden obtenerse puntos de destello altos si no se toman precauciones para evitar la pérdida de material volátil. No abra recipientes innecesariamente y no haga un traslado a menos que la temperatura de la muestra es por lo menos el equivalente de 10°C (18°F) debajo del punto de destello esperado. No use muestras de los recipientes resquebrajados para esta prueba.

No guarde muestras en recipientes de plástico (polietileno, polipropileno, etc.), porque el material volátil puede difundir a través de sus paredes.

Los hidrocarburos ligeros pueden estar presentes en la forma de gases, como propano o butano y no pueden ser detectados por ensayos por pérdidas durante las pruebas y cargas del aparato del ensayo.

### **PREPARACIÓN DEL APARATO**

Apoye el aparato en una mesa firme nivelada en un cuarto o compartimiento sin corriente de aire. Proteja la parte de encima del aparato de luz fuerte por cualquier medio conveniente para permitir descubrimiento listo del punto de destello. Ensaye en un compartimiento del laboratorio o cualquier lugar donde las corrientes de aire no estén en contacto con el aparato.

Apoye el termómetro en una posición vertical con el fondo de la bombilla a 6.4 mm (¼ in.) del fondo del vaso y localícelo a un punto medio entre el centro y lado del vaso en el diámetro perpendicular al arco (o línea) del barrido de la llama y en el lado opuesto del brazo del quemador.

### **PROCEDIMIENTO**

Llene el vaso, a cualquier temperatura conveniente que no exceda 100°C (180°F) sobre el punto de ablandamiento, para que la parte de encima del menisco esté en la línea del relleno. Para ayudar en esta operación, un Guante de Relleno Nivelado puede ser usado.

Encienda la llama y ajústelo a un diámetro de 3.2 a 4.8 mm (0.125 a 0.188 in.).

Aplice calor inicialmente para que aumente la proporción de temperatura de la muestra de 14 a 17°C (25 a 30°F) por minuto. Cuando la temperatura de la muestra es aproximadamente 56°C (100°F) debajo del punto de destello anticipado, disminuye el calor para que la proporción de temperatura aumente de 5 a 6°C (9 a 11°F) por minuto para 28°C (50°F) antes del punto de destello.

Pase la llama por el centro del vaso, en ángulos rectos al diámetro que atraviesa el termómetro. Con un movimiento liso y continuo, aplique la llama o en una línea recta o a lo largo de la circunferencia de un círculo. El tiempo consumido pasando la llama por el vaso será aproximadamente 1 segundo. Durante el último aumento

de 17°C en la anterior temperatura al punto de destello, se debe tener cuidado para evitar alterar los vapores en el ensayo del vaso a través de movimientos descuidados o respirar cerca del vaso.

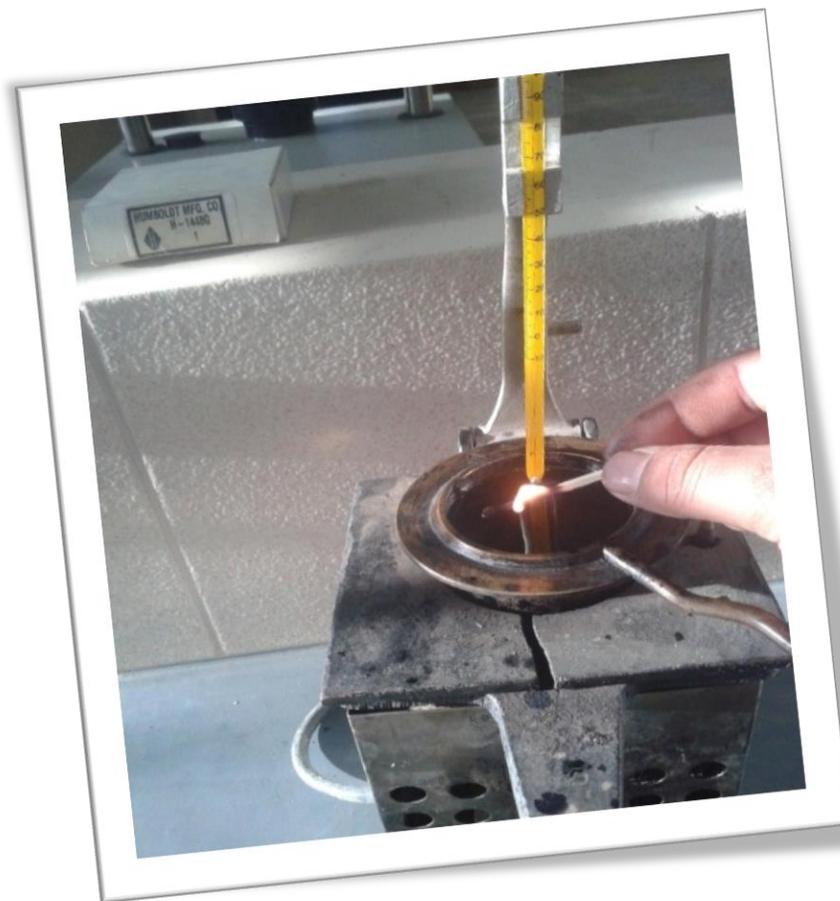
Grabe como el punto de destello observado la temperatura leída en el termómetro cuando un destello aparece en cualquier punto en la superficie del aceite, pero no confunda el verdadero destello con el halo azulado que a veces rodea la llama.

*Imagen A.28: Muestra en la copa de Cleveland*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen A.29: Muestra en ensayo pasando la llame de fuego.*



*Fuente: Elaboración Propia*

### **A.2.5.PUNTO DE ABLANDAMIENTO**

#### **PUNTO DE ABLANDAMIENTO (APARATO DEL ANILLO Y ESFERA)**

**(DESIGNACIÓN AASHTO: T 53-92)**

**(DESIGNACIÓN ASTM: D 36-89)**

### **ALCANCE**

Este método de ensayo cubre la determinación del punto de ablandamiento de betún en el rango de 30 a 157°C (86 a 315°F) usando el aparato de la anillo-y-esfera sumergido en agua destilada, glicerina USP o glicol del etileno.

### **RESUMEN DEL MÉTODO DE ENSAYO**

Dos discos horizontales de betún, fundidos en anillos de latón de apoyo, están acalorando a una proporción controlada en un baño líquido mientras soportan una esfera de acero. El punto de ablandamiento se informa como las pobres de las temperaturas a las cuales los dos discos se ablandan suficiente para permitir cada esfera, envolvió en betún, se caiga una distancia de 25 mm (1.0 in.).

### **SIGNIFICADO Y UTILIZACIÓN**

Los betunes son materiales del viscoelásticos sin puntos de fundición grandemente definidos; ellos se ponen gradualmente más suaves y menos viscosos cuando la temperatura aumenta. Por esta razón, los puntos de ablandamiento deben determinarse por un método arbitrario y estrechamente definido si los resultados van a ser reproducible.

El punto de ablandamiento es útil en la clasificación de betunes, como un elemento que establece la uniformidad de embarques o fuentes de suministro, y es indicativo de la tendencia del material a fluir en temperaturas elevadas encontradas en servicio.

### **HERRAMIENTAS**

#### **Anillos**

Dos anillo cuadrados de latón de apoyo que conforma a las dimensiones mostrado en Figura 8 (a).

**Plato para Verter**

Un plato plano liso de latón aproximadamente 50 por 75 mm (2 por 3 in.).

**Esferas**

Dos esferas de acero de 9.5 mm (3/8 in.) de diámetro, cada uno con masa de  $3.5 \pm 0.05$ g.

**Guías de Centrado de Las Esferas**

Dos guía de latón para centrar las esferas de acero, una para cada anillo, conforme con la forma general y las dimensiones mostradas en Figura 8 (b).

**Baño**

Una vasija de vidrio, capaz de ser calentada, no menos que 85 mm de diámetro y no menos que 120 mm de altura desde el fondo de la señal luminosa.

**Anillo Poseedor y Ensamblaje**

Un poseedor de latón diseñado para apoyar los dos anillos en una posición horizontal, conforme a la forma y dimensiones mostradas en la Figura 8 (c), apoyado en el ensamblaje ilustrada en la Figura 8 (d). El fondo de los anillos de apoyo en el poseedor del anillo debe estar a 25 mm (1.0 in.) sobre la superficie superior del plato del fondo, y la superficie más baja del plato del fondo debe estar a  $16 \pm 3$  mm ( $5/8 \pm 1/8$  in.) del fondo del baño.

**Termómetro**

Un Termómetro ASTM de Punto de Ablandamiento Bajo, teniendo un rango de -2 a +80°C (30 a 180°F), y conforme a los requisitos para Termómetro 15°C (15°F) como prescribe la Sección E 1. Un Termómetro ASTM de Punto de Ablandamiento Alto, teniendo un rango de 30 a 200°C (85 a 392°F), y conforme a los requisitos para Termómetro 16°C (16°C) como prescribe la Especificación

**ESPECÍMENES DE ENSAYO**

No empiece a menos de este planeado completar la preparación y ensayo de todos los especímenes del asfalto dentro de 6 horas y todos los especímenes de carbón-alquitrán dentro de 4½ horas. Caliente la muestra del betún con cuidado y revuelve

frecuentemente para prevenir sobrecalentamiento local, hasta que se haya puesto suficientemente fluido verter. Revuelva cuidadosamente para evitar la incorporación de burbujas aéreas en la muestra.

No tome más de 2 horas para calentar una muestra del asfalto a la temperatura de vertido; en ningún caso esto debe ser más de 110°C (200°F) sobre el punto de ablandamiento esperado del asfalto.

No tome más de 30 minutos para calentar una muestra de carbón-alquitrán a la temperatura de vertido; en ningún caso esto debe estar más de 55°C (100°F) sobre el punto de ablandamiento esperado del carbón-alquitrán.

Si la prueba debe repetirse después, no recalienta esta muestra; use una muestra fresca en un recipiente limpio para preparar nuevos especímenes de ensayo.

Caliente los dos anillos de latón (pero no el plato de vertido) a la temperatura aproximada de vertido, y colóquelos en el plato de vertido tratando con un agente del descargo.

Verter un ligero chorro del betún calentado en cada anillo, y entonces permite que los especímenes se enfríen en aire del ambiente por lo menos 30 minutos. Para materiales que sean suaves en temperatura de cuarto, refresque los especímenes por lo menos 30 minutos a una temperatura de aire de por lo menos 10°C (18°F) debajo del punto de ablandamiento esperado. Desde el tiempo que los discos del espécimen se vierten, no más de 240 minutos deben pasar antes de la completar el ensayo.

## **PROCEDIMIENTO**

Seleccione uno de los líquidos del baño siguientes y termómetros apropiados para el punto de ablandamiento esperado.

El agua destilada fresca hierva para puntos de ablandamiento entre 30 y 80°C (86 y 176°F); use Termómetro 15°C (15°F) o Termómetro 113°C (113°F). La temperatura de inicio del baño será  $5 \pm 1^\circ\text{C}$  ( $41 \pm 2^\circ\text{F}$ ).

Glicerina de USP para puntos de ablandamiento sobre 80°C (176°F) y arriba de 157°C (315°F); use Termómetro 16°C (16°F), o Termómetro 113°C (113°F). La temperatura de inicio del baño será  $30 \pm 1^\circ\text{C}$  ( $86 \pm 2^\circ\text{F}$ ).

Glicol del etileno para puntos de ablandamiento entre 30 y 110°C (86 y 230°F); use Termómetro 113°C (113°F). La temperatura de inicio del baño será  $5 \pm 1^\circ\text{C}$  ( $41 \pm 2^\circ\text{F}$ ).

Arme el aparato en una habitación cerrada del laboratorio con el anillo de espécimen, guías de la esfera centrada, y termómetro en posición, y llena el baño para que la profundidad del líquido sea  $105 \pm 3$  mm ( $4 \frac{1}{8} \pm \frac{1}{8}$  in.) con el aparato en posición. Si usando glicol del etileno, asegúrese que el ventilador de descarga de la habitación sea encendido y funcionando apropiadamente para remover los vapores tóxicos. Usando pinzas, pone las dos esferas de acero en el fondo del baño para que ellas alcancen la misma temperatura de inicio como el resto del ensamblaje.

Ponga el baño en el agua de hielo, si necesario, o suavemente calienta para establecer y mantener la temperatura de inicio del baño apropiada durante 15 minutos con el aparato en posición. Tenga cuidado de no contaminar el líquido del baño.

Usando pinzas de nuevo, ponga una esfera del fondo del baño en cada guía de centrando de la esfera.

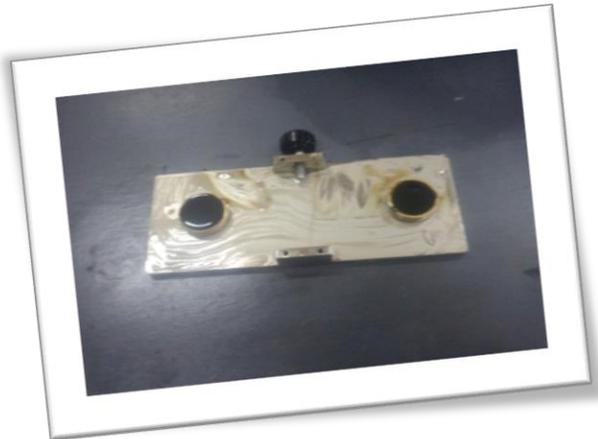
Caliente el baño por debajo para que la temperatura indicada por el termómetro aumente en una proporción uniforme de  $5^\circ\text{C}$  ( $9^\circ\text{F}$ )/min. Proteja el baño de corrientes de aire, usando escudos si necesario. No promedie la proporción de temperatura aumentada encima del periodo del ensayo. El máximo la variación permisible para cualquier periodo de 1 minuto después de los primeros 3 minutos será  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  ( $\pm 1.0^\circ\text{F}$ ). Rechace cualquier ensayo en el que la proporción de temperatura aumentada no caiga dentro de estos límites.

Grabe para cada anillo y esfera la temperatura indicada por el termómetro en el momento en el que el betún que rodea la esfera toca el fondo del plato. No haga ninguna corrección por el tallo emergente del termómetro. Si la diferencia entre las dos temperaturas excede  $1^\circ\text{C}$  ( $2^\circ\text{F}$ ), repita el ensayo.

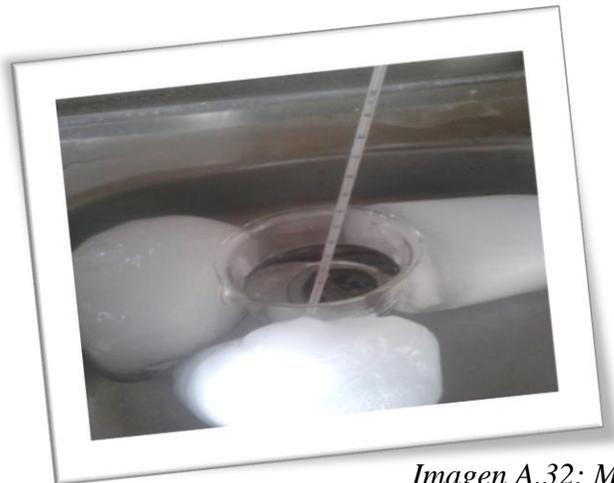
## **DETERMINACIÓN**

Dos discos horizontales de betún, fundidos en anillos de latón de apoyo, están acalorando a una proporción controlada en un baño líquido mientras soportan una esfera de acero. El punto de ablandamiento se informa como las pobres de las temperaturas a las cuales los dos discos se ablandan suficiente para permitir cada esfera, envolvió en betún, se caiga una distancia de 25 mm (1.0 in.).

*Imagen A.30: Muestra en molde para punto de Ablandamiento*



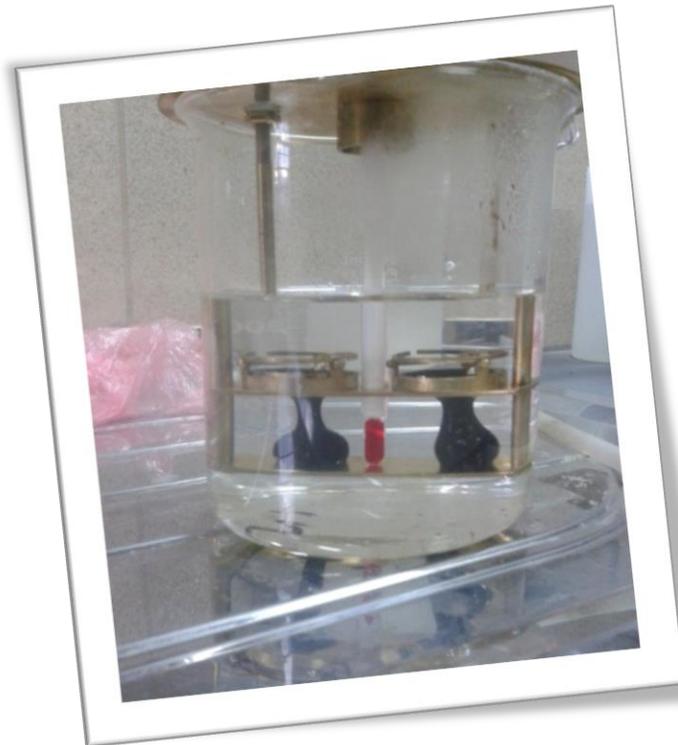
*Imagen A.31: Muestra en baño de 5°C por media hora.*



*Imagen A.32: Muestra sobre calor*



*Imagen A.33: Muestra en ensayo, hasta la caída de las esferas*



#### **A.2.6. PESO ESPECÍFICO**

##### **ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA DE MATERIALES BITUMINOSOS**

##### **SEMI-SÓLIDOS**

**(DESIGNACIÓN AASHTO: T 228-93)**

**(DESIGNACIÓN ASTM: D 70-76)**

## **ALCANCE**

Este método cubre la determinación de la gravedad específica de materiales bituminosos semi-sólidos, cementos del asfalto, y los alquitranes suaves por uso de un picnómetro.

## **GRAVEDAD ESPECÍFICA**

La gravedad específica de materiales bituminosos semi-sólidos, cementos del asfalto, y los alquitranes suaves se expresarán como la relación de la masa de un volumen dado del material a 25°C (77°F) o a 15.6°C (60°F) al que es igual de un volumen de agua a la misma temperatura, y debe expresarse así:

Gravedad Específica = 25/25°C (77/77°F) o 15.6/15.6°C (60/60°F)

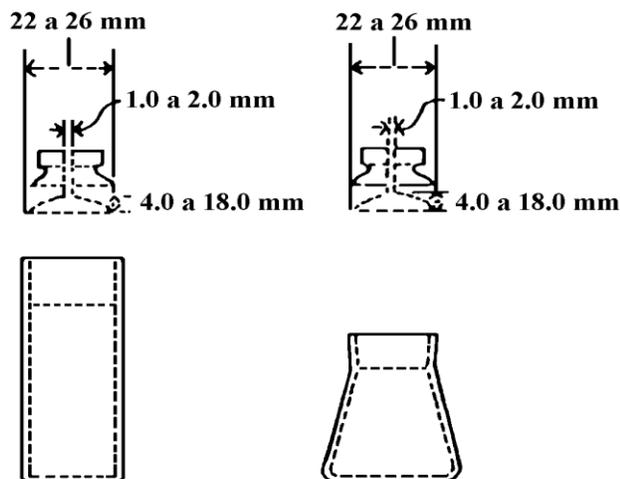
## **HERRAMIENTAS**

*Picnómetro*, consiste en un vaso cilíndrico o cónico de vidrio cuidadosamente deslustrado para recibir un tapón de vidrio de precisión encaje 22 a 26 mm en diámetro. El tapón debe estar provisto de un agujero 1.0 a 2.0 mm en diámetro, localizado centralmente en referencia al eje vertical. La superficie de la parte superior del tapón será lisa y sustancialmente plana, y la superficie inferior será cóncava para permitir al aire escapar a través del diámetro inferior. La altura de la sección cóncava debe ser de 4.0 a 18.0 mm en el centro. El picnómetro de tapones debe tener una capacidad de 24 a 30 ml, y pesará no más de 40 g. Se ilustran picnómetro convenientemente en Figura.

*Baño de agua*, a temperatura constante, capaz de mantener la temperatura dentro de 0.1°C (0.2°F) de la temperatura del ensayo.

*Termómetros*, de líquidos en vidrio de rango conveniente con graduaciones por lo menos cada 0.1°C (0.2°F) y un error de escala de máximo de 0.1°C (0.2°F) como se prescribe en ASTM Especificación E1. Termómetro normalmente usado es 63°C (63°F). Cualquier otro termómetro de exactitud igual puede usarse.

*Balanza*, una balanza que pase los requisitos de M 231, Clase B.



## MATERIALES

*Agua Destilada* - Agua destilada fresca, hervida y enfriada se usará para llenar el picnómetro y la copa.

## PREPARACIÓN DEL EQUIPO

Parcialmente llene unos 600 ml o a un nivel la copa más grande de forma baja de Griffin con agua destilada fresca, hervida y enfriada de manera que permitirá sumergir la parte superior del picnómetro a una profundidad de no menos de 40 mm. Parcialmente sumerja la copa en el baño de agua a una profundidad suficiente para permitir sumergir la parte inferior de la copa a una profundidad de no menos de 100 mm, de manera que la parte superior de la copa este por encima el nivel de agua del baño. Sujete la copa en esta posición.

Mantenga la temperatura del baño de agua dentro de 0.1°C (0.2 °F) de la temperatura del ensayo.

## CALIBRACIÓN DEL PICNÓMETRO

Limpie, seque, y pese completamente el picnómetro al miligramo más cercano. Designe esta masa como A.

Llene el picnómetro de agua destilada fresca y hervida a temperatura de la prueba y ponga el tapón en el picnómetro. No permita que ninguna burbuja de aire permanezca en el picnómetro.

Permita que el picnómetro permanezca en el agua para un periodo de no menos de 30 minutos. Quite el picnómetro, inmediatamente seque la parte superior del tapón con una toalla seca de una sola pasada, entonces rápidamente seque el residuo fuera del área del picnómetro y pesa al miligramo más cercano. Designe la masa del picnómetro más agua como B.

### **PROCEDIMIENTO**

*Preparación de la Muestra* - Caliente la muestra con cuidado y revuelve para prevenir sobrecalentamiento local, hasta que la muestra se haya puesto suficientemente fluida para verter. En ningún caso, la temperatura debe aumentarse a más de 56°C (100°F) sobre el punto de ablandamiento esperado para alquitrán, o a más de 111°C (200°F) sobre el punto de ablandamiento esperado para el asfalto. No caliente para más de 30 minutos encima de una llama o el plato caliente o para más de 2 horas en un horno, y evita incorporar burbujas de aire en la muestra.

Vierta suficiente muestra en el picnómetro limpio, seco y calentado para llenarlo cerca tres-cuarto de su capacidad. Tome precauciones para impedir al material de tocar los lados del picnómetro sobre el nivel final, y para prevenir la inclusión de burbujas de aire. Permita que el picnómetro y sus volúmenes se refresquen a temperatura del ambiente para un periodo de no menos de 40 minutos, y pese con el tapón al miligramo más cercano. Designe la masa del picnómetro más la muestra como C.

Llene el picnómetro con agua destilada, fresca y hervida a temperatura del ensayo y ponga el tapón en el picnómetro. No permita que ninguna burbuja de aire permanezca en el picnómetro.

Permita que el picnómetro permanezca en el baño de agua por un periodo de no menos de 30 minutos. Quite el picnómetro del baño. Seque y pese usando la misma

técnica y tiempo como eso emplearon. Designe esta masa de picnómetro más la muestra más agua como D.

### DETERMINACIÓN

Calcule la gravedad específica al tercer decimal más cercano como sigue:

$$GravedadEspecifica = \frac{C - A}{B - A - D + C}$$

Donde:

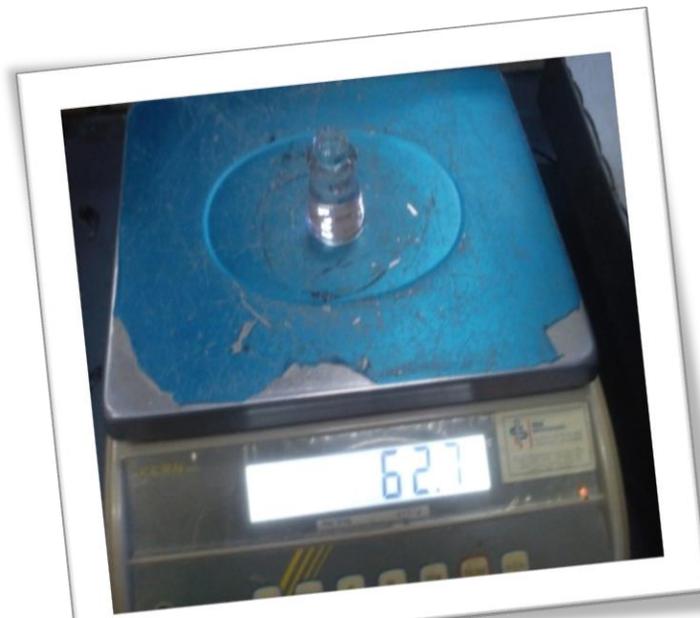
A = la masa del picnómetro (más el tapón)

B = la masa del picnómetro lleno con agua

C = la masa del picnómetro parcialmente lleno con asfalto

D = la masa del picnómetro más el asfalto más agua

*Imagen A.34: Peso de los picnómetros calibrados con agua.*



*Imagen A.35: Peso de muestras con previo baño María a 25°C*



*Imagen A.36: Baño María a 25°C*



Tabla A:8 Resultados de la caracterización del Betun

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	grs.	38.0	36.9	38.0			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	grs.	62.7	62.0	62.7			
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	55.8	56.5	56.2			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	62.8	62.3	62.9			
Peso Especifico	grs./cm3	<b>1.003</b>	<b>1.013</b>	<b>1.008</b>	<b>1.008</b>	1	1.05

Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	>280	>290	>295	<b>&gt;288</b>	>232	-
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm.	115	105	107	<b>109</b>	75	-
Penetración a 25°C, 100s. 5seg.(0.1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	92	94	98			
	Lectura N°2	97	93	95			
	Lectura N°3	91	99	92			
	Promedio	mm.	93	95	95	<b>95</b>	85
Viscosidad Cinemática 135 °C	mm²/s	325	297	318	<b>313</b>	250	-
Punto de ablandamiento	°C	44.0	47.0	43.0	<b>45</b>	42	53

### ANEXO 3

#### A.3. DISEÑO MARSHALL

#### ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL

**(DOCUMENTO DE REFERENCIA: ASTM D-1559)**

**PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS Y COMPACTACIÓN DE MUESTRAS**

#### APLICACIÓN

El siguiente procedimiento será aplicado solamente a mezclas asfálticas en caliente, preparadas con cemento asfáltico y agregados no mayores de 2.54 cm (1 pulg.), el diámetro del molde Marshall será de 101.6 mm (4 pulg.). Cuando el tamaño de la partícula excede los 2.5 cm (1 pulg.) se emplean moldes de 152.4 mm (6 pulg.), este procedimiento no es aplicable a ese tipo de muestras.

### **EQUIPOS DE LABORATORIO**

1. *Molde de Compactación.* Consiste de una placa de base plana, molde y collar de extensión cilíndricos. El molde tiene un diámetro interior de 101.6 mm (4") y altura aproximada de 76.2 mm (3"); la placa de base plana y el collar deben ser intercambiables.
2. *Martillo de compactación* con base plana circular de apisonado de 98.4 mm (3 7/8") de diámetro, equipado con un pisón de 4.54 kg (10 lb.) de peso total, cuya altura de caída es de 457.2 mm (18").
3. *Extractor de Muestras de Asfaltos.* Para extraer el espécimen del molde, en forma de disco con diámetro de 100 mm (3.95") y 12.7 mm (1/2") de espesor.
4. *SopORTE para molde o portamolde.* Dispositivo con resorte de tensión diseñado para sostener rígidamente el molde de compactación sobre el pedestal.
5. *Mordaza.* Consiste de dos semi-cilindros, con un radio de curvatura interior de 50.8 mm (2") de acero enchapado para facilitar su fácil limpieza. El segmento inferior termina en una base plana con dos varillas perpendiculares que sirven de guía.
6. *Medidor de deformación.* Consiste en un deformímetro dividido en centésimas de milímetro. Estará sujeto al segmento superior y cuyo vástago se apoyará, cuando se realiza el ensayo, en una palanca ajustable acoplada al segmento inferior. Las deformaciones del anillo se medirán con un deformímetro graduado en 0.001 mm.
7. *Prensa.* Para llevar a la falla a la muestra, será mecánica con una velocidad uniforme de 50.8 mm/min.

8. *Medidor de Estabilidad.* La resistencia de la probeta en el ensayo se medirá con un anillo dinamométrico acoplado a la prensa, de 20 kN (2039 kgf) de capacidad, con una sensibilidad de 50 N (5 kgf) hasta 5 kN (510 kgf) y 100 N (10 kgf) hasta 20 kN (2 039 kgf). Las deformaciones del anillo se medirán con un deformímetro graduado en 0.001 mm.

9. *Discos de Papel Filtrante de 4 pulg.*

10. *Horno.* Horno capaz de mantener la temperatura requerida con un error menor de 3 °C (5 °F) se emplea para calentar los agregados, material asfáltico, conjunto de compactación y muestra.

11. *Baño.* El baño de agua con 150mm (6”) de profundidad mínima y controlado termostáticamente para mantener la temperatura a  $60^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{C}$  ( $140^{\circ} \pm 1.8^{\circ} \text{F}$ ), deberá tener un falso fondo perforado o estar equipado con un estante para mantener las probetas por lo menos a 50.8 mm (2”) sobre el fondo del tanque.

12. *2 Recipientes* de dos litros de capacidad para calentar los agregados y para mezclar el asfalto y agregado.

13. *Tamices.* De 50 mm (2”), 37.5 mm (1 1/2”), 25 mm (1”), 19.0 mm (3/4”), 12.5 mm (1/2”), 9.5, N 200.

14. *Termómetros blindados.* De 10°C a 232°C (50°F a 450°F) para determinar las temperaturas del asfalto, agregados y mezcla, con sensibilidad de 3°C. Para la temperatura del baño de agua se utilizará termómetro con escala de 20°C a 70°C y sensibilidad de 0.2°C (68°F a 158°F + 0.4°F).

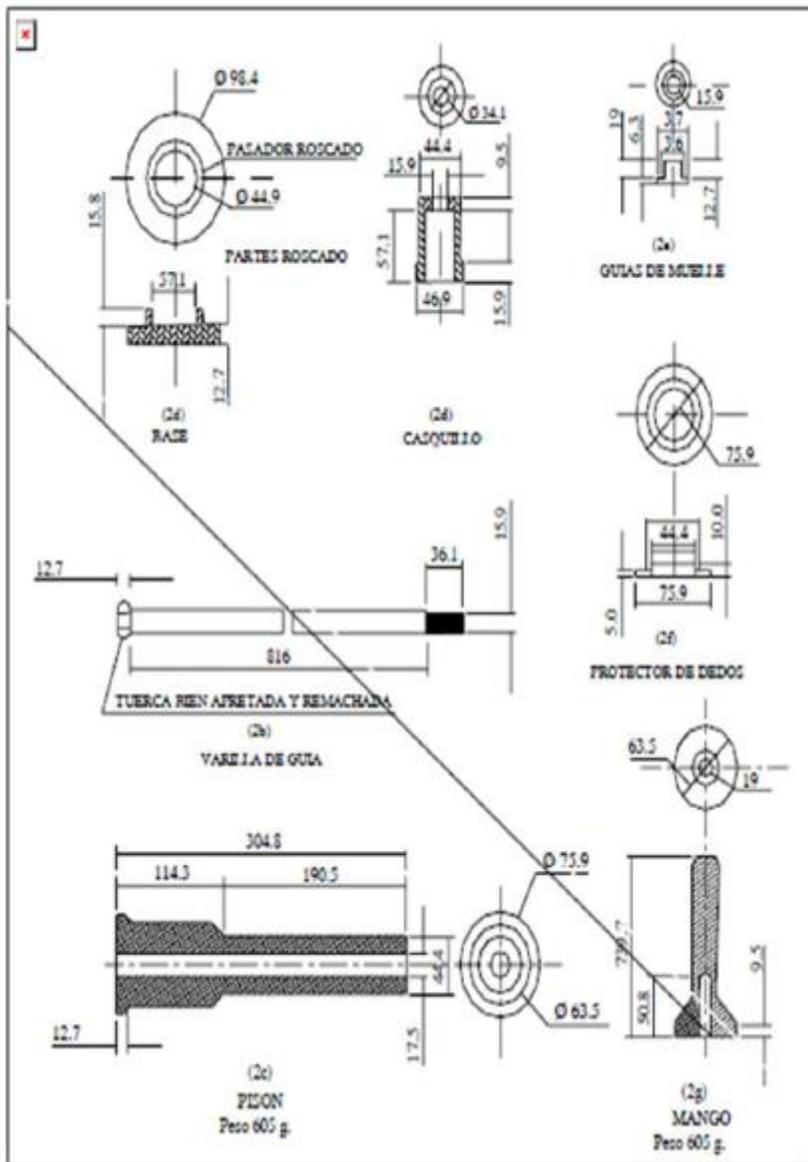
15. *Balanza.* Para pesar agregado y asfalto de 5 kg. De capacidad, y sensibilidad de un 1 gr. Para pesar probetas compactadas de 2 kg. De capacidad y sensibilidad de 0.1 gr.

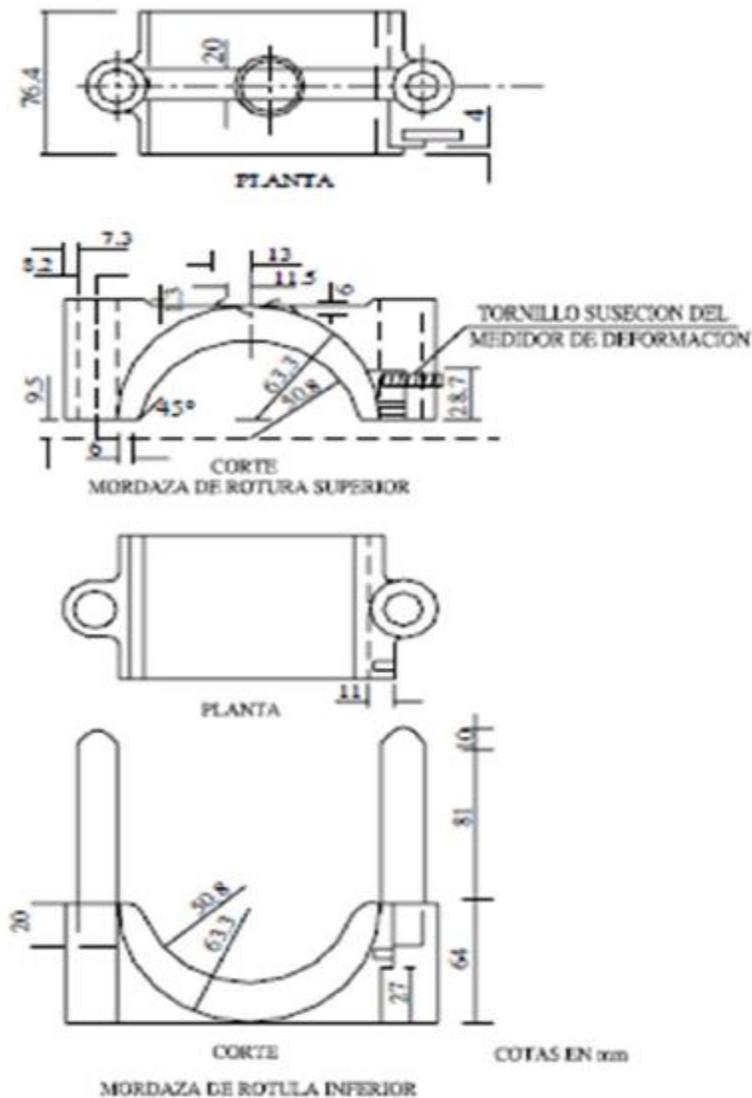
16. *Pirex de 500 cm<sup>3</sup>*

17. *Guantes de cuero.* Para poder manipular el equipo caliente

18. *Bandejas taradas*

19. *Espátulas*





### MOLDES BASE MARTILLO Y COLLARÍN MARSHALL

Generalmente se prepara un espécimen de prueba, mida la altura del mismo ( $h_1$ ) y verifique la altura requerida del espécimen Marshall:  $63.5 \pm 5.1$  mm ( $2.5 \pm 0.20$  pulg.). Si el espécimen está fuera del rango, ajuste la cantidad de agregados con la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{h}{h_1} * 1150 \text{ gr}$$

Donde

Q: peso del agregado para un espécimen de 63.5 mm (2.5pulg.) de altura, gr.

h: altura requerida, que será 63.5 mm o 2.5 pulg.

h1: altura del espécimen de prueba, mm (pulg.)

Calentar a la temperatura de mezcla la suficiente cantidad de asfalto para preparar 18 especímenes; tres especímenes compactados por cada porcentaje de contenido de asfalto, los incrementos porcentuales de asfalto son de 0.5% con por lo menos dos contenidos antes y después del Optimo Contenido de Asfalto. A tres mezclas cerca al óptimo contenido de asfalto se les mide la gravedad específica Rice o Máxima Densidad Teórica (TMD).

***Nota.- No mantener el ligante por más de una hora a la temperatura de mezcla ni emplear ligante bituminoso recalentado. Durante el período de calentamiento del ligante se debe agitar frecuentemente dentro del recipiente para evitar los sobrecalentamientos.***

De acuerdo a las especificaciones se determina el número de golpes por cara para la compactación Marshall.

El recipiente en el que se realizará la mezcla será manchado con una mezcla de prueba para evitar la pérdida de ligante y finos adheridos al recipiente, se limpiará solamente arrastrando con una espátula todo el material posible. Colocar la cantidad de agregado requerido en esa vasija y añada la cantidad de asfalto caliente necesaria por peso, para el porcentaje de cemento asfáltico de la mezcla deseada.

$$\% \text{ de cemento asfáltico} = \frac{\text{Peso cemento asfáltico}}{\text{Peso arido} + \text{Peso cemento asfáltico}}$$

Mezclar el cemento asfáltico y agregados hasta que éstos estén totalmente cubiertos. La mezcla puede hacerse manual o mecánicamente. Cuando la mezcla requiera filler, éste se agregará luego que los agregados estén cubiertos por el ligante

Verificar la temperatura de los materiales recién mezclados, si está sobre la temperatura de compactación, deje enfriar; si está por debajo, elimine el material y prepare una nueva muestra.

Se coloca dentro del conjunto del molde y la base del martillo compactador limpios, un disco de papel filtrante de 10 cm de diámetro. Se calientan en el horno o en un baño de agua a una temperatura comprendida entre los 93° a 149°C. Verter la mezcla y emparejarla con una espátula caliente 15 veces alrededor del perímetro y 10 veces en el interior. Limpiar el material del collar y montura dentro del molde de tal manera que el medio sea ligeramente más alto que los bordes. Fijar el molde y base en el pedestal. Coloque el martillo precalentado dentro del molde, y aplique el número de golpes según las especificaciones, la altura de caída del martillo es de 18" (457 mm). Mantener el eje del martillo de compactación perpendicular a la base del molde durante la compactación.

Retire el molde de la base. Coloque un papel filtrante en la superficie e inviértalo de tal manera que la cara superficial se encuentre abajo. Reemplace el collar del molde y fíjelo junto con la base en el pedestal. Aplicar el número de golpes especificados. Después de la compactación remover la base y colocar el molde y collar sobre el extractor de muestras. Con el molde y el collar de extensión hacia arriba en la máquina de ensayo, aplicar presión y forzar el espécimen dentro del collar de extensión, levantar el collar del espécimen. Cuidadosamente transferir el espécimen a una superficie plana, dejarlo de pie para que repose de 12 a 24 horas a temperatura ambiente, identificarlos con códigos alfanuméricos usando Crayolas.

Determine la gravedad específica bulk de cada espécimen tan pronto como las probetas compactadas se han enfriado a la temperatura ambiente, según AASHTO T166.

Se determina calculando la relación entre su peso al aire y su volumen.

Pesar el espécimen al aire.

Sumerja la muestra en agua por unos minutos, pesar la muestra en su condición saturada superficialmente seca (SSD) en el agua.

Sacar la muestra del agua, secar el exceso de agua y pesar en su condición SSD en el aire.

Calcular el volumen restando el peso del espécimen SSD en el aire y el peso del espécimen SSD sumergida. La fórmula empleada será:

$$G_{mb} = \frac{W_D}{W_{SSD} + W_{sub}}$$

Donde:

Gmb Gravedad Específica Bulk de la muestra compactada

WD Peso del espécimen al aire

WSSD Peso del espécimen en su condición SSD en el aire

Wsub Peso del espécimen sumergido

Se determina el peso específico bulk promedio de todas las probetas hechas con el mismo contenido asfáltico. Los valores dispares no se incluyen en el cálculo para lo cual se tendrá en cuenta el siguiente rango de variación con respecto al valor medio

Peso Específico Bulk  $\pm 1\%$

Los valores calculados del peso específico bulk, así ensayados, dan resultados más reales, pero existe otro procedimiento de laboratorio que cabe destacar, es el que podemos encontrar en las nuevas normas emitidas por el ministerio de Transportes, Comunicaciones,

Vivienda y Construcción.

El *primer método* se emplea cuando la textura superficial de las probetas es cerrada e impermeable. El volumen de la probeta se obtiene restando el peso de la probeta en el aire y el peso de la probeta sumergida en agua sin haber recubierto su superficie parafinada. La fórmula empleada será:

$$G_{mb} = \frac{W_D}{W_D + W_{sub}}$$

Donde:

$G_{mb}$  Gravedad Específica Bulk de la muestra compactada

$W_D$  Peso del espécimen al aire

$W_{sub}$  Peso del espécimen sumergido

El *segundo método* se aplica a mezclas cuya superficie es abierta y permeable. El volumen aparente se determina restando el peso de la probeta en el aire y el peso de la probeta en el agua pero habiéndola recubierto previamente de una capa de parafina. El peso específico bulk viene dado por la fórmula:

$$G_{mb} = \frac{W_D}{W_{pD} - W_{ppsub} - \frac{W_{pD} - W_D}{\gamma_p}}$$

Donde:

$G_{mb}$  Gravedad Específica Bulk de la muestra compactada

$W_D$  Peso del espécimen al aire

$W_{pD}$  Peso del espécimen parafinado en el aire

$W_{ppsub}$  Peso del espécimen parafinado en el agua

$\gamma_p$  Peso específico de la parafina

Los especímenes deben pesarse antes de ser parafinados, a continuación se sumergen en un recipiente con parafina caliente. Si es necesario, se da pinceladas de parafina en los puntos mal cubiertos. Dejar enfriar la parafina durante media hora y determinar el peso en el aire a la temperatura ambiente e inmediatamente se pesa en agua.

Calcule la gravedad específica Rice en las mezclas asfálticas en caliente ( $G_{mm}$ ) de acuerdo a la norma AASHTO T209, su valor se emplea en el cálculo de los vacíos. Si la mezcla contiene agregados absorbentes se recomienda colocarla en el horno (manteniéndola a la temperatura de mezcla) por cuatro horas de tal manera que el cemento asfáltico sea absorbido completamente por el agregado antes del ensayo. Mantener la mezcla en un recipiente tapado mientras se encuentra en el horno. Si el ensayo se hace por triplicado en la mezcla que contiene un porcentaje cerca al

óptimo contenido de asfalto, promediar los tres resultados; calcule la gravedad específica efectiva de los agregados.

Si se realiza el cálculo de la gravedad específica Rice en cada una de las muestras a diferentes contenidos de asfalto, calcular la gravedad específica efectiva de agregados en cada caso. Calcule el promedio de las gravedades específicas efectivas y el promedio de las gravedades específicas Rice.

En ausencia de datos proporcionados por el Método Rice, la gravedad específica puede calcularse con una relación matemática que considera las gravedades específicas bulk y aparente de los componentes de la mezcla:

$$G_{mm} = \frac{100}{\frac{\% \text{ asfalto}}{G_{sa} \text{ asfalto}} + \frac{\% \text{ grueso}}{A} + \frac{\% \text{ fino}}{B} + \frac{\% \text{ filler}}{C}}$$

Siendo:

$$A = \frac{G_{sb} + G_{sa}}{2} \quad , \text{para el agregado grueso.}$$

$$B = \frac{G_{sb} + G_{sa}}{2} \quad , \text{para el agregado fino.}$$

$$C = \frac{G_{sb} + G_{sa}}{2} \quad , \text{para el filler.}$$

Donde:

Gsb Gravedad específica bulk

Gsa Gravedad específica aparente

#### **Paso D: Densidad y vacíos de los especímenes**

Se refiere a las relaciones peso-volumen, completando los cálculos con los siguientes pasos:

D.1 Para cada espécimen, use la gravedad específica bulk ( $G_{mb}$ ) y gravedad específica Rice de la mezcla ( $G_{mm}$ ). Calcular el porcentaje de vacíos en el total de la mezcla, VTM.

$$VTM = \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) * 100$$

D.2 Calcular la densidad de cada espécimen Marshall como sigue:

$$Densidad \left(\frac{g}{cm^3}\right) = G_{mb} * \delta_w$$

D.3 Calcule el porcentaje de vacíos en el agregado mineral, VMA, para cada espécimen Marshall usando la gravedad específica bulk en los agregados ( $G_{sb}$ ) para los pasos A.2, la gravedad específica bulk de la mezcla compactada ( $G_{mb}$ ) para el paso C.12, y el contenido de asfalto por peso de mezcla total ( $P_b$ )

$$VMA = \left(1 - \frac{G_{mb}(1 - P_b)}{G_{sb}}\right) * 100$$

D.4 Calcule el porcentaje de vacíos llenos de asfalto para cada espécimen Marshall usando el VTM y VMA como sigue:

$$VFA = \left(\frac{VMA - VTM}{VMA}\right) * 100$$

### **Paso E: Estabilidad Marshall y Ensayo de Flujo**

E.1 Calentar el agua del baño a 140°F (60°C) y colocar los especímenes a ser ensayados por un período de 30 a 40 minutos. Los especímenes se ubicarán de manera escalonada para que todos los especímenes sean calentados el tiempo especificado antes de ser ensayados.

E.2 Se limpian perfectamente las superficies interiores de las mordazas de rotura y se engrasan las barras guía con una película de aceite de manera que la mordaza superior se deslice libremente. Luego de calentarlos el tiempo necesario, se irán

sacando uno a la vez, quitarles el exceso de agua con una toalla y colocarlo rápidamente en la mordaza Marshall.

E.3 Colocar el medidor de flujo sobre la barra guía marcada y compruebe la lectura inicial.

Aplicar la carga a una velocidad de deformación de 2 pulg/min (50.8 mm/minuto) hasta que ocurra la falla, es decir, cuando se alcanza la máxima carga y luego disminuye según se lea en el dial respectivo. El punto de rotura se define como la carga máxima obtenida y se registra como el valor de estabilidad Marshall, expresado en Newtons (lbf). Mientras se está determinando la estabilidad se mantiene firmemente el medidor de deformación en su posición sobre la barra guía; libérese cuando comience a decrecer la carga y anote la lectura. Este será el valor del “flujo” para la muestra expresado en centésimas de pulgada.

Por ejemplo si la muestra se deformó 3.8 mm (0.15”) el valor de flujo será de 15. Este valor expresa la disminución de diámetro que sufre la probeta entre la carga cero y el instante de la rotura. Flujo en 0.01 pulgadas (0.25 mm). El ensayo se realiza en un minuto contado desde que se saca el espécimen del baño.

E.4 Repita los pasos E.2 y E.3 hasta que todos los especímenes sean ensayados.

1. El tiempo total transcurrido entre sacar el espécimen del baño y aplicar la carga es de 60 segundos como máximo.
2. El tiempo total en el agua de baño para cada juego de tres especímenes es entre 30 a 40 minutos.

### **Paso F: Tabulación y Gráfico de los Resultados de Ensayo**

F.1 Tabule los resultados de ensayo, corrija los valores de estabilidad para cada espécimen

(ASTM D1559), y calcule el promedio de cada tres juegos de especímenes.

#### **F.2 Grafique:**

1. Contenido de asfalto Vs. Densidad (por unidad de peso)
2. Contenido de asfalto Vs. Estabilidad Marshall
3. Contenido de asfalto Vs. Flujo
4. Contenido de asfalto Vs. Porcentaje de vacíos, VTM

5. Contenido de asfalto Vs. Porcentaje de vacíos del agregado mineral, VMA

6. Contenido de asfalto Vs. Porcentaje de vacíos lleno de asfalto, VFA

### **F.3 Revise la tendencia de cada gráfico:**

1. La estabilidad versus el contenido de asfalto puede tener dos tendencias:

1.1 La estabilidad crece a medida que el contenido de asfalto aumenta, alcanza un pico y luego decrecer.

1.2 La estabilidad decrece a medida que el contenido de asfalto aumenta y no presenta un pico. Esta curva es común en mezclas asfálticas en caliente recicladas.

2. El flujo crece con el incremento del contenido de asfalto.

3. La densidad crece con el incremento de asfalto, alcanzo un pico, y luego decrece. La densidad pico usualmente ocurre a un contenido de asfalto mayor que la estabilidad pico.

4. El porcentaje de vacíos de aire decrecerá con el crecimiento del contenido de asfalto.

5. El porcentaje de vacíos del agregado mineral, VMA, decrece con el crecimiento del contenido de cemento asfáltico, alcanza un mínimo, y luego crece.

6. El porcentaje de vacíos llenos de asfalto, VFA, crece con el incremento de asfalto.

### **Paso G: Determinación del Optimo Contenido de Asfalto**

G.1 Los siguientes dos métodos son comúnmente empleados para determinar el óptimo contenido de asfalto de los gráficos:

#### **Método 1.- El procedimiento NAPA, en TAS 14**

1. El contenido de asfalto corresponderá al contenido de vacíos especificado (por lo general 4%). Este es el óptimo contenido de asfalto.

2. Determine las siguientes propiedades en el óptimo contenido de asfalto de los gráficos:

2.1 Estabilidad Marshall

2.2 Flujo

2.3 Porcentaje de vacíos del agregado mineral, VMA

2.4 Porcentaje de vacíos llenos de asfalto, VFA

3. Compare cada uno de estos valores con las especificaciones, si se verifican todos los valores, el óptimo contenido de asfalto será el elegido. Si alguno de estos valores estuviera fuera del rango la mezcla deberá ser rediseñada.

**Método 2.- Método del Instituto del Asfalto en MS-2**

1. Determine: (a) contenido de asfalto en la estabilidad máxima  
(b) contenido de asfalto en la densidad máxima  
(c) contenido de asfalto en el punto medio del rango de volúmenes de aire especificado (4% típicamente)
2. Promediar los tres contenidos de asfaltos seleccionados
3. Para el promedio del contenido de asfalto, vea la curva planteada y determine las siguientes propiedades:
  - 3.1. Estabilidad Marshall
  - 3.2. Flujo
  - 3.3. Porcentaje de vacíos del agregado mineral, VMA
  - 3.4. Porcentaje de vacíos llenos de asfalto, VFA
4. Comparar los valores del paso 3 con los criterios de aceptación del siguiente cuadro:

**Criterio de Diseño Marshall para Superficies y Bases**

Diseño de Mezclas Método Marshall	Tráfico					
	Ligero		Medio		Pesado	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Compactación Nº golpes/cara	35		50		75	
Estabilidad, lb(N)	750 (333)		1200 (5333)		1800 (8000)	
Flujo 0.01 Pulg (0.25 mm)	8	18	8	16	8	14
Vacios de aire, %	3	5	3	5	3	5
Vacios en el agregado mineral	Ver el gráfico siguiente					

Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot Mix Types. The Asphalt Institute, MS-2, May 1984

G.2 Encontrar el criterio de falla para alguna propiedad requerida es un trabajo especial para determinar la mezcla que será empleada en la construcción. Si el

criterio VMA no puede hallarse, la gradación del agregado debe modificarse y volver a diseñar la mezcla.

#### **G6.4 OBSERVACIONES**

1. Este método está limitado al proyecto y control de mezclas asfálticas elaboradas en planta estacionaria, en caliente, empleando cemento asfáltico.
2. Con el ensayo Marshall se determina la estabilidad y el flujo de mezclas asfálticas cilíndricas, ensayadas a 60° C.
3. El valor de estabilidad se determina midiendo la carga necesaria para producir la falla del espécimen, aplicada en sentido normal al eje.
4. La deformación vertical producida en el espécimen por dicha carga será el valor del flujo.

El valor de estabilidad expresa la resistencia estructural de la mezcla compactada, y está afectado principalmente por el contenido de asfalto, la composición granulométrica y el tipo de agregado.

5. El valor de flujo representa la deformación requerida para producir la fractura. Este valor es una indicación de la tendencia de la mezcla para alcanzar una condición plástica, y consecuentemente de la resistencia que ofrecerá la carpeta asfáltica a deformarse bajo la acción de las cargas impuestas por los vehículos.

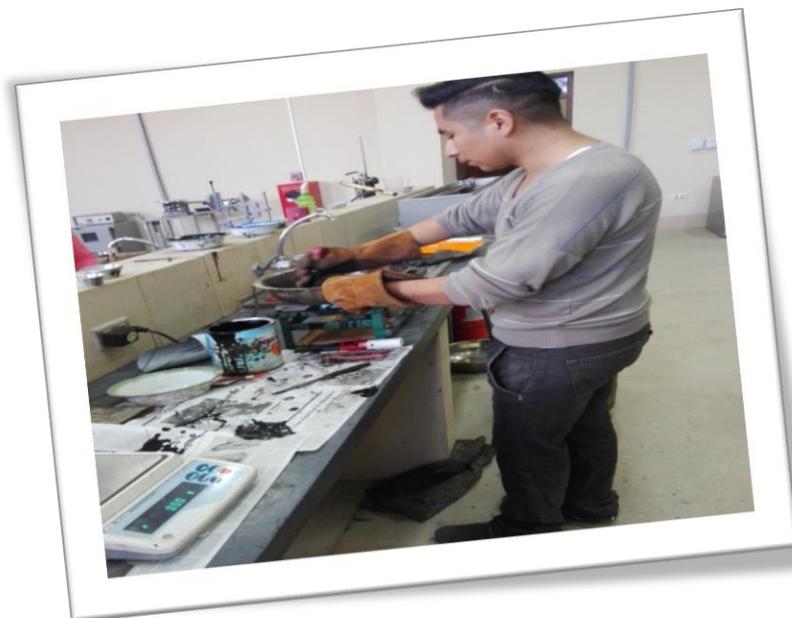
*Imagen A.37: Muestra del Agregado para ser mezclado con el Betun.*



*Imagen A.38: Muestra del calentado del Betun para luego ser mezclado con el agregado*



*Imagen A.39: Mezclado de la de los agregados con el Betun a una temperatura de 140°C*



*Imagen A.40: Compactacion con el Martillo Marshall de 75 golpes a ambos lados de la briqueta*



*Imagen A.41: Muestras Obtenidas del Ensayo Marshall*



## Determinación de la Densidad

*Imagen A.42: Pesaje de cada briqueta en su estado seco al aire libre.*



*Imagen A.43: Briquetas en Baño María a 25°C por 5 min.*



*Imagen A.44: Pesaje de briquetas saturadas con superficie seca.*



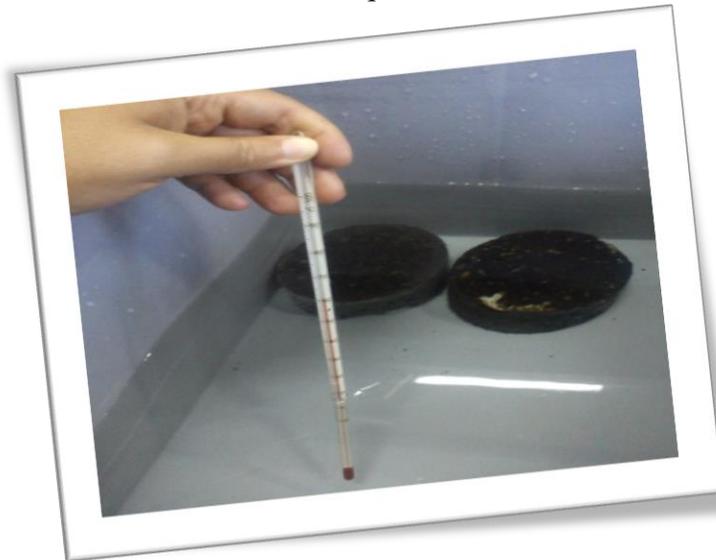
*Imagen A.45: Determinación del peso sumergido en el agua.*



*Fuente: Elaboración Propia*

## Determinación de la Estabilidad y Fluencia

*Imagen A.46: Briquetas en baño María a 60°C por 35 min para cada briqueta.*



*Imagen A.47: Hacer correr y lecturar el dial de Estabilidad (dentro del anillo Marshall) y el dial de deformación para el Flujo.*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen A.48: Briqueta ensayada (rota)*



*Fuente: Elaboración Propia*

## BIBLIOGRAFIA

American Society for Testing and Materials ASTM. (2006). *Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Bituminous Mixtures*. Pennsylvania: ASTM.

American Society for Testing and Materials ASTM. (2010). *Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Bituminous Mixtures*. Pennsylvania: ASTM.

Asphalt Institute MS-22. (2009). *Construction of Hot Mix Asphalt Pavements, Second Edition*. En A. I. MS-22, *Asphalt Institute MS-22* (pág. Cap. 3). United States: Asphalt Institute MS-22.

Nuria Querol Sola Jorge Ortiz Ripoll, Pilar Manas Pascual MEZCLAS BITUMINOSAS.

ALFONSO MONTEJO FONSECA, INGENIERIA DE PAVIMENTOS TOMO II “Evaluacion estructural, obras de mejoramiento y nuevas tecnologias”

National Association for PET Container Resources NAPCOR. (2011). *2011 Report on Postconsumer PET Container Recycling Activity Final Report*. United States: NAPCOR.

Wikipedia. (21 de Mayo de 2016). *Wikipedia*. Recuperado el 21 de Febrero de 2016, de Wikipedia:  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Clasificaci%C3%B3n\\_granulom%C3%A9trica](http://es.wikipedia.org/wiki/Clasificaci%C3%B3n_granulom%C3%A9trica)

Wikipedia, La Enciclopedia Libre. (11 de Abril de 2011). *Wikipedia*. Recuperado el 30 de Noviembre de 2013, de Wikipedia:  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Tereftalato\\_de\\_polietileno](http://es.wikipedia.org/wiki/Tereftalato_de_polietileno)